

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій та радіотехніки

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва спеціальності

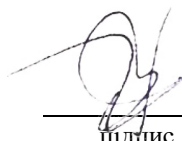
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Дослідження міцності склоспаїв у виробах РЕА

ДРТР. 215003.01.12.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-19-1

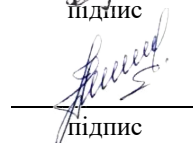


підпис

Д.О. Крушинський

Ініціали, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доц.



підпис

Л.В. Карпова

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



підпис

Ю.М. Бойко

Ініціали, прізвище

«02» грудня 2020 р.

Хмельницький, 2020

Хмельницький національний університет

Факультет програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій та радіотехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою _____ ТР

_____ Бойко Ю.М.

«07» вересня _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Крушинському Денису Олеговичу

1 Тема роботи: «Дослідження міцності склоспаїв у виробках РЕА»

керівник роботи Карпова Леся Вікторівна, к.т.н, доцент

Затверджено наказом по університету від «1» вересня 2020 р. № 118

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2020 р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: підвищення міцнісної надійності металоскляних виробів електроніки

Об'єкт дослідження: міцнісна надійність виробів електроніки, виготовлених за технологією металоскляного спаювання

Предмет дослідження: розрахунково-експериментальні методи і засоби досліджень міцності виробів електроніки, виготовлених за технологією склоспаю на прикладі фотодатчиків

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

- сучасний стан забезпечення міцності виробів електроніки, виготовлених склоспаюванням;

- теоретичні основи розрахунку на міцність металоскляних виробів електронної техніки;

- методи та технічні засоби експериментальних досліджень міцності металоскляних виробів РЕА;

- експериментальна перевірка теоретичних положень.

Завдання отримав _____

Науковий керівник _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	1. Огляд проблеми забезпечення міцності виробів електроніки, виготовлених склоспаюванням	18.09.2020	<i>виконано</i>
2	Формулювання задач досліджень	20.09.2020	<i>виконано</i>
3	2.1 Розрахунок на міцність фотодатчиків. Визначення внутрішніх напружень у корпусах	07.10.2020	<i>виконано</i>
4	2.2 Результати розрахунку вікончастих і бусинкових склоспаїв за різними методиками	14.10.2020	<i>виконано</i>
5	2.3-2.5 Визначення напружень в корпусах фотодатчиків при роботі в розріджених шарах атмосфери. Статистичне оцінювання міцності скла з урахуванням поверхневих дефектів. Методика проектного розрахунку на міцність металоскляних фотодатчиків РЕА	25.10.2020	<i>виконано</i>
6	3. Методи та технічні засоби експериментальних досліджень міцності металоскляних виробів РЕА	31.10.2020	<i>виконано</i>
7	4. Експериментальна перевірка теоретичних положень	5.11.2020	<i>виконано</i>
8	Формулювання висновків до роботи	15.11.2020	<i>виконано</i>
9	Оформлення пояснювальної записки до ДР	25.11.2020	<i>виконано</i>
10	Оформлення презентаційних матеріалів	30.11.2020	<i>виконано</i>

Студент


 Підпис

Д.О. Крушинський

Ініціали, прізвище

Керівник роботи


 Підпис

Л.В. Карпова

Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОНІКИ, ВИГОТОВЛЕНИХ СКЛОСПАЮВАННЯМ.....	14
1.1 Сучасні технології з'єднання скла з металом у виробках електроніки.....	14
1.2 Проблеми міцнісної надійності металоскляних виробів електроніки.....	20
1.3 Граничні напруження в склоспаях з урахуванням дефектів скла. Умова міцності.....	22
Висновки до першого розділу. Постановка задачі дослідження.....	29
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ.....	30
2.1 Розрахунок на міцність фотодатчиків. Визначення внутрішніх напружень у корпусах.....	31
2.1.1 Напруження в склі при одночасній дії тиску і температури.....	31
2.1.2 Контактні тиски, радіальні, окружні і осьові напруження в бусиноквих склоспаях.....	37
2.1.3 Колові напруження в кришках корпусів фотодатчиків.....	43
2.1.4 Визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик з'єднувальних матеріалів.....	43
2.1.5 Визначення напружень в круглій скляній пластині вікончастого склоспаю.....	45
2.2 Результати розрахунку вікончастих і бусиноквих склоспаїв за різними методиками.....	47
2.2.1 Розрахунок напружень у вікончастих скласпаях.....	47
2.2.2 Розрахунок напружень в бусиноквих склоспаях.....	47
2.2.3 Аналітичний розрахунок температурного поля при склоспаї	47

вікончастого вузла кришок фотодатчиків на індукційній установці	
2.3 Визначення напружень в корпусах фотодатчиків при роботі в розріджених шарах атмосфери.....	53
2.4 Статистичне оцінювання міцності скла з урахуванням поверхневих дефектів з використанням енергетичного підходу Гріффітса.....	57
2.5 Методика проектного розрахунку на міцність металоскляних фотодатчиків РЕА, що герметизуються компаундами.....	64
Висновки до другого розділу.....	65
3 МЕТОДИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ РЕА.....	67
3.1 Апаратура та методика проведення експериментів.....	67
3.2 Методика тензометрування фотодатчиків при висотних випробуваннях.....	74
Висновки до третього розділу.....	76
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ.....	77
4.1 Вимірювання зусиль у виводах мікросхем і напружень в склоспаї	77
4.1.1 Осьові зусилля, що руйнують контактну групу мікросхеми 401–14–2.....	78
4.1.2 Вимірювання зусиль, що діють на вивід при його формуванні.....	80
4.1.3 Осьові зусилля, що руйнують контактну групу мікросхеми 301.12–1.....	83
4.1.4 Вимірювання напружень при формуванні виводів.....	84
4.1.5 Вимірювання внутрішніх напружень в склоспаї.....	85
4.2 Дослідження напружень, що виникають і накопичуються в вузлах фотодатчиків в процесі їх виготовлення.....	89
4.2.1. Вплив термічної обробки на величину залишкових	

напружень в кришках корпусів фотодатчиків після їх штампування.....	89
4.2.2 Вплив відпалу на величину залишкових напружень в кришках корпусів фотодатчиків після операції склоспаювання.....	90
4.2.3 Вимірювання залишкових напружень у склі фотодатчиків..	94
4.2.4 Дослідження впливу зварювання кришки і корпусу фотодатчика на величину залишкових напружень в кришці і склі	96
4.3 Вимірювання напружень в корпусах і склі фотодатчиків при висотних випробуваннях.....	98
4.4 Порівняння теоретичних та експериментальних результатів.....	102
Висновки до четвертого розділу.....	103
ВИСНОВКИ.....	105
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	109
ДОДАТКИ.....	115
Додаток А. Презентаційні матеріали за результатами виконання дипломної роботи.....	115
Додаток Б. Матеріали апробації наукових результатів отриманих у дипломній роботі.....	134

ВСТУП

В сучасній військовій і цивільній техніці використовується значна кількість різноманітних складних конструкцій радіоелектронних засобів (РЕЗ), до надійності яких ставляться високі вимоги. Такі вимоги продиктовані високою вартістю деяких РЕЗ та наслідками їх відмови. Наприклад, частка вартості бортових РЕЗ літака-винищувача складає до 80% від його загальної вартості. Склоспаї, які є герметичним щільним з'єднанням скла і металу, є важливим елементом конструкції різноманітних електронних виробів: вакуумних трубок, газорозрядних трубок, ламп розжарювання, герметичних напівпровідникових діодів, герконів та інших металевих або керамічних корпусів електронних компонентів. Досвід експлуатації виробів РЕА, виготовлених за технологією склоспаю (Glass-to-metal seal) показує, що значна частина з них виходить з ладу через механічне руйнування. Як правило, воно викликане недостатньою здатністю розпеченого скла змочувати метал для утворення щільного зв'язку, а також неузгодженим температурним розширенням скла і металу, що може викликати зниження міцності і розгерметизацію ущільнення при охолодженні складання.

Незважаючи на те, що питання міцності склоспаїв у виробках РЕА досліджували значна кількість учених, таких як Ройзман В.П., М. Fakouri Hasanabadi, Alexander Roth, Fred Rosebury, John Frederik Lancaster, Richard B. Belser, Замирец Н. В., Михайлов П. Г., Черенцов М. А., Стрельбицкий В. В., недостатньо вивченими є теоретичні питання причин виникнення дефектів склоспаїв у процесі виготовлення і експлуатації, методів контролю міцнісних характеристик і а також рекомендацій із недопущення руйнувань.

Загальна проблема галузі телекомунікацій і радіотехніки, на вирішення якої спрямовано роботу, є підвищення надійності виробів РЕА.

Об'єктом дослідження є міцнісна надійність виробів електроніки, виготовлених за технологією металоскляного спаювання.

Предмет дослідження – розрахунково-експериментальні методи і засоби досліджень міцності виробів електроніки, виготовлених за

Метою дослідження є підвищення міцнісної надійності металоскляних виробів електроніки.

Задачі дослідження:

1. Виявити причини проблем міцності бусинкових і вікончастих склоспаїв фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11.
2. Проаналізувати розкид значень ФМХ матеріалів при створенні РЕА і дослідити його можливий вплив на збільшення напружень.
3. Проаналізувати температурні напруження при індукційному способі склоспаювання і обґрунтувати межі його використання в залежності від перепаду радіуса між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла.
4. Встановити зв'язок між експлуатаційними умовами, за яких виникають перепади тиску навколишнього середовища, і виникненням додаткових напружень у вузлах і деталях фотодатчиків.
5. Удосконалити методику визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках та методику визначення температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу.
6. Розвинути енергетичний підхід Гріффітса для розрахунку небезпечних руйнівних напружень, що відповідають мінімальній і максимальній довжині мікротріщин скла.
7. Визначити сумарні напруження в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів впливу на міцність виробів.
8. Обґрунтувати вибір тензометричної та іншої вимірювальної апаратури для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків.

9. Розробити комплексну методику тензометрування металоскляних фотодатчиків, у тому числі при висотних випробуваннях з використанням вакуумної установки.

10. Експериментально визначити напруження, що виникають і накопичуються у корпусах фотодатчиків під час їх виготовлення.

11. Експериментально дослідити вплив перепаду атмосферного тиску на внутрішні напруження корпусів фотодатчиків.

12. Перевірити експериментально ефективність розроблених теоретичних методів розрахунку сумарних напружень і контактних тисків у вікончастих і бусиноквих склоспаях, обумовлених конструкторськими, технологічними та експлуатаційними чинниками.

У дослідженнях, викладених у роботі, використовувались методи аналізу статичної міцності; методи опору матеріалів (теорія Ляме), методи математичної статистики для обробки результатів експериментів; експериментальні дослідження із застосуванням методу електротензометрії з використанням тензометричної апаратури зі спеціально розробленою схемою температурної компенсації; допоміжні методи і засоби для проведення експериментів: вольтметри, генератори, осцилографи, вакуумна установка. Експериментальні дослідження проводились у лабораторії статичної і динамічної міцності виробів радіоелектроніки Хмельницького національного університету.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше* експериментально встановлено, що індукційний спосіб склоспаювання створює стрибкоподібний тепловий режим. Для виробів, у яких перепад радіусів дорівнює 4–6 мм і більше, індукційний спосіб склоспаювання є неприпустимим, оскільки викликає великий градієнт температури і температурні напруження.

2. *Виявлено* факт виникнення додаткових напружень у вузлах і деталях фотодатчиків при перепадах тиску навколишнього середовища.

3. *Розвинуто* розрахунково-експериментальний метод визначення законів зміни температури по радіусу фотодатчика при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках, який відрізняється врахуванням температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу, що дає змогу підвищити точність методу.

4. *Розвинуто* енергетичний підхід Гріффітса, на базі якого запропоновано метод розрахунку небезпечних руйнівних напружень, що відповідають мінімальній і максимальній довжині мікротріщин, які обмежують із заданим ступенем ймовірності інтервал допустимих значень, що дало можливість підвищити ефективність конструювання і виготовлення, а також міцнісну надійність металоскляних елементів РЕА.

Робота виконувалась в межах науково-дослідної роботи 2Б-2017 «Розробка наукових основ захисту виробів радіоелектроніки, закріплених на об'єднувальних платах, від деформацій плат, а плат від динамічних і теплових навантажень» та 3Б-2020 «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії в виробах військової і невійськової техніки».

Практичне значення отриманих результатів:

1. Обґрунтовано, що при виготовленні бусинкових склоспаїв для зменшення внутрішніх напружень використання скла марки С52-1 є більш ефективним замість скла С48-2. Рекомендовано для забезпечення умов міцності металоскляних виробів РЕА вводити вхідний контроль ФМХ матеріалів, що використовуються, обмежуючи розкид цих характеристик наперед заданою областю.

2. Знайдено границі застосування розрахункової методики визначення температурних напружень. Методика призначення допустимого розкиду геометричних розмірів виробів і ФМХ матеріалів, що використовуються при створенні фотодатчиків РЕА дає можливість підвищити міцність конструкцій при виготовленні.

3. Розроблені практичні методики:

- визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках;
- визначення температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу;
- визначення сумарних напружень в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів, що впливають на міцність виробів;
- проектного розрахунку на міцність фотодатчиків РЕА, що містять склоспаї і герметизується компаундами, що враховує конструкторські, технологічні і експлуатаційні фактори, що призводять до виникнення напружень у виробках;
- тензометрування металоскляних фотодатчиків, що включає етапи наклеювання, термообробку і контроль тензорезисторів та їх захист від агресивного середовища;
- тензометрування фотодатчиків при висотних випробуваннях з використанням спеціальної вакуумної установки.

4. Підібрано апаратуру для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків: тензометричної апаратури для реєстрації напружень і деформацій у фотодатчиках та спеціальної установки з метою визначення механічних напружень, для розрізання корпусів фотодатчиків. Апаратура дає можливість здійснювати висотні випробування.

5. Встановлено, що:

- відпалювання кришок корпусів фотодатчиків після їх штампування істотно зніжує внутрішні напруження від $\sigma = -48,01$ МПа до $\sigma = -2,2$ МПа;
- операція склоспаювання на індукційній установці ЛЗ-13 створює значні (до $\sigma = +14,7$ МПа) розтягувальні напруження в скляній частині виробу;
- наступний після операції склоспаювання відпал істотно знижує внутрішні напруження в скляній частині вузла (до $\sigma = -4,9$ МПа);
- наступні технологічні операції значно збільшують внутрішнє

напруження в металевий ($\sigma = -84,2$ МПа) і скляній ($\sigma = 9,01$ МПа) частинах.

б. Встановлено, що найкращою, з точки зору міцності, є монолітна конструкція, найменш міцною є пустотіла, в матеріалі якої при перепаді тиску $0,84 \dots 105$ Па виникають напруження $\sigma = 58,8$ МПа, що досягають за величиною нижньої границі текучості ($\sigma = 49-245$ МПа) сплаву Д-1. У скляній частині корпусів фотодатчиків при випробуваннях на висотність виникають значні внутрішні напруження $\sigma = 5,98$ МПа, які, додаючись до залишкових напружень, можуть призводити до руйнування виробів.

Результати роботи можуть бути використані як на етапі проектування, застосовуючи для металоскляних конструкцій РЕА розроблені методи і засоби визначення напружено-деформовного стану, так і при їх виробництві. Окрім того результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі студентів галузі знань «Електроніка та телекомунікації» під час вивчення фахових дисциплін, що торкаються питань надійності, конструювання і технології виробництва РЕА.

Практична значимість отриманих результатів полягає у тому, що запропоновані методи і засоби дадуть можливість конструктивно і технологічно підвищити міцність і надійність металоскляних виробів РЕА, що дасть значний економічний ефект.

Апробація результатів дослідження – публікація «Розрахунково-експериментальні методи підвищення міцності металоскляних виробів РЕА» у Міжнародному науковому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», №2, 2020. – С. 15=21.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОНІКИ, ВИГОТОВЛЕНИХ СКЛОСПАЮВАННЯМ

1.1 Сучасні технології з'єднання скла з металом у виробі електроніки

Скляні (Glass-to-metal seal), які є герметичним щільним з'єднанням скла і металу, є важливим елементом конструкції вакуумних трубок, електричних розрядних трубок, ламп розжарювання, герметичних напівпровідникових діодів, герконів, герметичних скляних вікон в металевих корпусах і металевих або керамічних корпусах електронних компонентів.



Рис. 1.1 – Сучасні елементи РЕА, виготовлені за технологією скляного спаювання

При правильному виконанні таке ущільнення є герметичним (герметичність, хороша електрична ізоляція, особливі оптичні властивості, наприклад, УФ-лампи). Щоб домогтися такого ущільнення, повинні витримуватися дві властивості:

- розпечене скло має мати здатність змочувати метал для утворення щільного зв'язку;
- температурне розширення скла і металу повинно бути точно узгодженим, щоб ущільнення залишалося міцним при охолодженні складання.

Наприклад, розглядаючи металевий дріт в ущільненні скляної колби, встановлено, що контакт металевого скла може зламатися, якщо коефіцієнти температурного лінійного розширення (КТЛР) не узгоджені належним чином. У разі, коли КТЛР металу більше, ніж КТЛР скла, ущільнення має високу ймовірність руйнування при охолодженні. При зниженні температури металевий дріт стискається більше, ніж скло, що призводить до сильного розтягування скла, що в кінцевому підсумку призводить до його руйнування. З іншого боку, якщо КТЛР скла більше, ніж КТЛР металевого дроту, ущільнення буде затягуватися при охолодженні, так як до скла прикладається сила стиснення.

Скло і метал можуть з'єднуватися один з одним чисто механічними способами, що зазвичай дає більш слабкі з'єднання, або за допомогою хімічної взаємодії, коли оксидний шар на поверхні металу утворює міцний зв'язок зі склом. Ці кислотно-лужні реакції є основними причинами взаємодії між скловолокном і металом в присутності оксидів металів на поверхні металу. Після повного розчинення поверхневих оксидів в склі подальший розвиток взаємодії залежить від активності кисню на межі поділу. Активність кисню може бути збільшена за рахунок дифузії молекулярного кисню через деякі дефекти, такі як тріщини. Крім того, відновлення термодинамічно менш стабільних компонентів в склі (і вивільнення іонів кисню) може збільшити активність кисню на інтерфейсі. Іншими словами, окислювально-відновні реакції є основними причинами взаємодії скло-метал за відсутності оксидів металів на поверхні металу. [1]

Для забезпечення герметичного ущільнення воно не повинно містити бульбашок. Бульбашки найчастіше створюються газами, що виходять з металу при високій температурі; Тому дегазація металу перед герметизацією важлива, особливо для нікелю, заліза та їх сплавів. Це досягається шляхом нагрівання металу у вакуумі або іноді в атмосфері водню, а в деяких випадках навіть на повітрі при температурах вище тих, які використовуються

в процесі герметизації. Окислення металевої поверхні також знижує виділення газу. Велика частина газу, що виділяється, утворюється через наявність домішок вуглецю в металах; їх можна видалити нагріванням в водні [2].

Зв'язок скло-оксид є міцнішим за скло-метал. Оксид утворює шар на поверхні металу, причому частка кисню в металі змінюється від нуля до стехіометрії оксиду і самого скла. Занадто товстий оксидний шар має тенденцію бути пористим на поверхні і механічно слабким, відшаровується, що знижує міцність зв'язку та створює можливі шляхи витоку уздовж границі розділу метал-оксид. Тому правильна товщина оксидного шару має вирішальне значення.

Металева мідь погано зчіплюється зі склом. Оксид міді (I), однак, змочується розплавленим склом і частково розчиняється в ньому, утворюючи міцний зв'язок. Оксид також добре зв'язується з основним металом. Але оксид міді (II) викликає слабкі з'єднання, які можуть протікати, і його утворенню необхідно запобігти.

Для приклеювання міді до скла поверхня повинна бути належним чином окислена. Оксидний шар повинен мати потрібну товщину; занадто мало оксиду не забезпечить достатньої кількості матеріалу для закріплення скла, занадто велика кількість оксиду призведе до руйнування оксидного шару, і в обох випадках з'єднання буде слабким і, можливо, негерметичним. Для поліпшення зчеплення зі склом оксидний шар слід обробити борируванням; це досягається, наприклад, зануренням гарячої частини в концентрований розчин бури і подальшим її нагріванням протягом певного часу. Ця обробка стабілізує оксидний шар, утворюючи на його поверхні тонкий захисний шар бората натрію, тому оксид не стає занадто товстим під час подальшої обробки і з'єднання. Шар повинен мати однорідний відтінок від темно-червоного до пурпурного [3, 4]. Оксид бору з борованого шару дифундує в скло і знижує його температуру плавлення. Окислення

відбувається за рахунок дифузії кисню через шар розплавленого бората і утворення оксиду міді (I), в той час як утворення оксиду міді (II) відзначає зниження [2].

Ущільнення «мідь-скло» має виглядати яскраво-червоним, майже червоним; допустимі також рожевий, хересний і медовий кольори. Занадто тонкий оксидний шар здається світлим, аж до кольору металевий міді, а надто товстий оксид виглядає дуже темним.

Безкисневому мідь слід використовувати, якщо метал вступає в контакт з воднем (наприклад, в трубці, заповненій воднем, або при роботі в полум'ї). Зазвичай мідь містить невеликі включення оксиду міді (I). Водень дифундує через метал і реагує з оксидом, відновлюючи його до міді і утворюючи воду. Однак молекули води не можуть дифундувати через метал, застрягають в місці включення і викликають окрихчування.

Оскільки оксид міді (I) добре зв'язується зі склом, він часто використовується в комбінованих пристроях скло-метал. Пластичність міді може бути використана для компенсації невідповідності теплового розширення, наприклад, в ущільненнях з ріжучої кромкою. Для наскрізної подачі дроту часто використовується дріт *dumet* - залізо-нікелевий сплав з мідним покриттям. Однак його максимальний діаметр обмежений приблизно 0,5 мм через теплове розширення.

Мідь може бути герметично з'єднана зі склом без оксидним шаром, але отримане з'єднання буде менш міцним.

Платина має таке ж теплове розширення, як скло, і добре змочується розплавленим склом. Однак він не утворює оксидів, його міцність зв'язку нижче. Пломба має металевий колір і обмежену міцність.

Як і платина, золото не утворює оксидів, які можуть сприяти зв'язуванню. Тому зв'язки скло-золото мають металевий колір і є слабкими. Золото, як правило, використовується для склометалічних пломб дуже рідко. Існують спеціальний склад вапняно-натрієвого скла, відповідного тепловому

розширенню золота, що містить триоксид вольфраму і оксиди лантану, алюмінію і цирконію [5].

Срібло утворює на своїй поверхні тонкий шар оксиду срібла. Цей шар розчиняється в розплавленому склі і утворює силікат срібла, сприяючи міцному зв'язку [6].

Нікель може зв'язуватися зі склом або як метал, або через шар оксиду нікелю (II). Металевий стик має металевий колір і низьку міцність. Шов оксидного шару має характерний зелено-сірий колір. Нікелювання можна використовувати так само, як і міднювання, щоб поліпшити зчеплення з основним металом [3].

Залізо рідко використовується для виводів, але часто покривається склоподібною емаллю, де поверхня розділу також є з'єднанням скло-метал. Міцність зв'язку також визначається характером оксидного шару на його поверхні. Присутність кобальту в склі призводить до хімічної реакції між металевим залізом і оксидом кобальту, в результаті чого оксид заліза розчиняється в склі, а кобальт сплавляється з залізом і утворює дендрити, що врастають в скло і поліпшують міцність зв'язку [6].

Залізо не може бути пов'язано безпосередньо зі свинцевим склом, оскільки воно реагує з оксидом свинцю і відновлює його до металевого свинцю. Для герметизації свинцевого скла його необхідно покрити міддю або використовувати проміжне скло, що не містить свинцю. Залізо схильне до утворення бульбашок газу в склі через залишкові домішки вуглецю; їх можна видалити нагріванням у вологому водні. Також рекомендується покриття міддю, нікелем або хромом [2].

Хром - метал з високою реакційною здатністю, присутній у багатьох сплавах заліза. Хром може реагувати зі склом, відновлюючи кремній і утворюючи кристали силіциду хрому, що врастають в скло і скріплюють разом метал і скло, покращуючи міцність зв'язку [6].

Ковар, сплав заліза, нікелю і кобальту, має низьке теплове розширення, подібне високоборосилікатному склу, і часто використовується для скло-металевих ущільнень, особливо для застосування в рентгенівських трубках або скляних лазерах. Це може приклеювати до скла через проміжний оксидний шар нікелю (II) оксид і оксид кобальту (II); частка оксиду заліза мала через його відновлення кобальтом. Міцність зв'язку сильно залежить від товщини і характеру оксидного шару [4] [6]. Присутність кобальту полегшує плавлення і розчинення оксидного шару в розплавленому склі. Сірий, сіро-блакитний або сіро-коричневий колір вказує на хороший зв'язок. Металевий колір вказує на відсутність оксиду, а чорний колір вказує на надмірно окислений метал, що в обох випадках призводить до слабкого стику [2].

Молібден зв'язується зі склом через проміжний шар оксиду молібдену (IV). Через низький КТЛР відповідного склу, молібден, як і вольфрам, часто використовується для з'єднання скла з металом, особливо в поєднанні з алюмосилікатних склом. За своєю високою електропровідністю він перевершує нікель-кобальт-залізні сплави. Світлотехнічна промисловість застосовує його в якості прохідного кабелю для лампочок та інших пристроїв. Молібден окислюється набагато швидше, ніж вольфрам, і швидко утворює товстий шар оксиду, який погано тримається, тому його окислення має бути обмежене тільки жовтуватим або, щонайбільше, синьо-зеленим кольором. Оксид летючий і випаровується у вигляді білого диму при температурі вище 700°C ; надлишок оксиду можна видалити шляхом нагрівання в інертному газі (аргоні) до 1000°C . Стрічки з молібдену використовуються замість дротів, де потрібні більш високі струми (і більш високі поперечні перерізи дротів) [2].

Вольфрам зв'язується зі склом через проміжний шар оксиду вольфраму (VI). Правильно сформована зв'язка має характерний мідний/помаранчевий/коричнево-жовтий колір в безлітєвому склі; а в склі, що містять літій, зв'язок синього кольору через утворення вольфрамату літію. Завдяки низькому КТЛР, відповідному склу, вольфрам часто використовується для з'єднання

скла з металом. Вольфрам утворює задовільні зв'язки зі склом з аналогічним КТЛР, такими як високоборосилікатне скло. Поверхня металу і скла повинна бути гладкою, без подряпин. [4] Вольфрам має найнижчий КТЛР серед металів і найвищу температуру плавлення.

1.2 Проблеми міцнісної надійності металоскляних виробів електроніки

Проблеми міцності склоспаїв досліджувались у багатьох роботах [7-10]. Ґрунтовною науковою працею, де описані проблеми і результати досліджень міцності склоспаїв електроніки, є робота [11]. Автор розглядає міцність фоторезисторів та інших елементів, що конструктивно виконані як система “вивід–скло–корпус” і система “скло–корпус” (рис. 1.2).

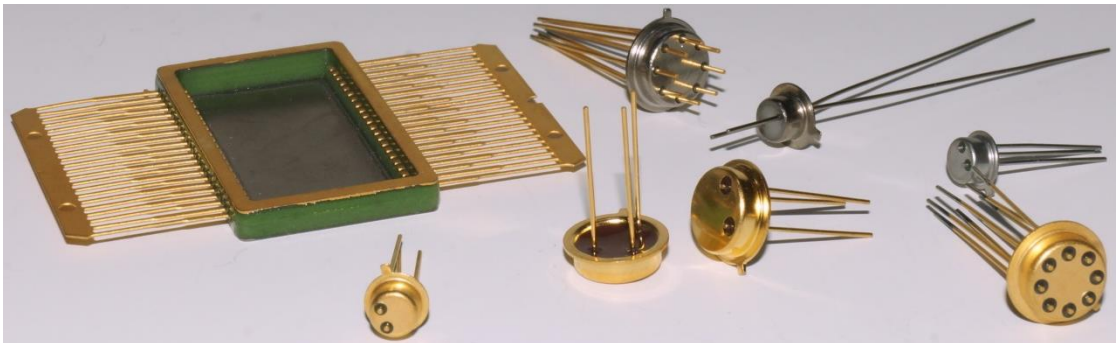


Рис. 1.2 – Електронні елементи, конструктивно виконані як система “вивід–скло–корпус” і система “скло–корпус”

У роботі [12] розроблено нову конструкторсько-технологічну концепцію герметизації радіоелектронних модулів в корпусах з алюмінієвих сплавів з використанням багатофункціонального покриття на основі Ni і Si, що отримується імпульсною лазерною наплавкою. Отримано формулу для визначення рухливості наплавлення одного шару, з урахуванням якої знаходять загальну тривалість лазерного наплавлення і утворення багатофункціонального покриття.

В роботі [13] розглядаються різноманітні датчики фізичних величин, виготовлені як склоспаї на основі порошкового скла і ситалоцементів. Для таких речовин температура з'єднання (кристалізації) є значно нижчою, ніж у примісно-силікатного скла. Температура спаювання у ситалоцементів варюється у діапазоні 320...650°C в залежності від складу скла. Зусилля, що прикладається до з'єднувальних деталей є невеликим і становить від 7 до 700 кПа, в залежності від з'єднувальних площ. Для зручності нанесення скла може бути використаний електрофорез, а також нанесенням на центрифугу дрібнодисперсного склопорошку на основі водного або спиртового розчину.

Групи, що з'єднуються: Si-скло, Si-кераміка, Si-метал. Склоспаї на основі аморфного і кристалічного порошкового скла забезпечують герметичне з'єднання, в тому числі і на ділянках кристалів, де мають металізацію, незважаючи на непланарний характер рельєфу поверхня-металізація (наявність сходинки на кордоні кремній-металева плівка). Як показали дослідження, в вузлах ДФВ, з'єднаних за допомогою ситалоцементів, рівень залишкових механічних напружень є досить малим.

При складанні напівпровідникових датчиків тиску в роботі був розроблений і впроваджений технологічний процес з'єднання кремнієвого (кристала) з коваровим корпусом за допомогою ситалоцементу. Як показали випробування, даний метод з'єднання забезпечує необхідну герметичність, міцність і надійність. Використовувався ситалоцемент марки СЦН 52-1. Згідно з розробленою технологією після очищення і знежирення місць з'єднання, ситалоцемент наноситься на поверхні з'єднується кремнієвого кристала і металевих корпусу. Потім вузли витримуються на повітрі з метою видалення розчинника-спирту, після чого кристал накладається на корпус, збірки поміщають у піч, де за відповідною циклограмою нагрівається до температури плавлення ситалоцементу, витримується певний час з метою вирівнювання температури у вузлі, а потім плавно охолоджується разом з піччю. Після охолодження вузла з метою зняття залишкових механічних

напружень в кристалі і корпусі, складання піддавалися багаторазовому термоциклюванню в діапазоні позитивних і негативних температур. Як показав досвід виробництва ДФВ, використання ситалоцементних спаїв в конструкціях мікромеханічних вузлів і датчиків є найбільш оптимальним при дрібносерійному характері виробництва, оскільки зазначена технологічна операція практично не піддається автоматизації.

У роботі [14] автор досліджує визначення розкиду і встановлення граничних значень зусиль, що руйнують склоспаї, з подальшим їх порівнянням з нормативними. Досліджено причини відмов слабострумових реле РЕМ-49 внаслідок руйнування склоспаю. Встановлено, що мікротріщини, обертання виводів в склі і скла в корпусі спостерігалися в тих реле, в яких міцність склоспая є істотно нижчою, інші ж реле без шкоди переносили зусилля, що виникають при монтажі РЕМ-49 на плату функціонального вузла.

У роботі [15] відзначається, що індій і деякі його сплави можуть використовуватися в якості припою, здатного змочувати скло, кераміку і метали і з'єднувати їх разом. Індій має низьку температуру плавлення і дуже м'який; м'якість дозволяє йому пластично деформуватися і поглинати напруження через невідповідність теплового розширення. Через дуже низький тиск пара індій знаходить застосування в скло-металевих ущільненнях, що використовуються у вакуумній технології [16] і криогенних застосуваннях [17].

1.3 Граничні напруження в склоспаях з урахуванням дефектів скла. Умова міцності

На сьогодні експериментально встановлено, що руйнування реальних матеріалів відбувається при навантаженнях в 10-100 разів менших, ніж передбачають теоретичні дані [18-22]. Різниця реальної міцності від

теоретичної пояснюється за допомогою уявлення про існування різних типів дефектів [22].

Умови, при яких крихкі матеріали (зокрема, скло) руйнуються, вельми істотно залежать від локальних факторів, що статистично змінюються, таких як включення, границі зерен, дрібні недосконалості тощо. Загальновідомо, що надрізи і тріщини значно зменшують міцність тіла навіть тоді, коли вони є дуже малими. На дні надрізу в будь-якому матеріалі виникає концентрація напружень. Якщо матеріал пластичний [23], то виниклі напруження не можуть перевищити певного критичного рівня, при якому у вершини надрізу починається текучість, він затуплюється, а концентрація напружень зменшується. Більш того, пластичні матеріали, як правило, зазнають «деформаційне твердіння», тобто опір течінню на деформаційному ділянці на дні надрізу зростає, оскільки зростання гостроти надрізу призупиняється. У крихкому матеріалі [23, 24] напруження, що виникають на дні надрізу, можуть досягти величини, що перевищує природну міцність матеріалу, що призводить до зростання тріщин, яке зазвичай закінчується повним і миттєвим руйнуванням. Швидке зростання тріщини або повне руйнування часто відбуваються настільки раптово, що неможливо зареєструвати цей процес, що починається з невеликої тріщинки, надрізу, порожнини або іншої нерегулярності. Такі нерегулярності ще до того, як почнеться руйнування, мають важливе значення, оскільки змінюють напружений стан в безпосередній близькості від себе, зазвичай приводячи до місцевої його інтенсифікації. Це явище може носити різко виражений характер (наприклад, на кінцях дуже тонкої еліптичної порожнини), завдяки чому малий об'єм матеріалу в такому місці може опинитися деформованим набагато сильніше, ніж в будь-якому іншому місці [25].

Математична теорія поширення тріщин поки ще не настільки розроблена, щоб можна було висунути в якості загальноприйнятого деяке єдине уявлення про цей процес.

Як вказується в роботі [23], А. Гріффітс, якому належить класичний виклад проблеми руйнування на основі енергетичного підходу, припустив, що незвично низьку міцність всіх крихких матеріалів можна пояснити існуванням в них притаманних їм субмікроскопічних тріщин. Це відправне положення піддалося надалі значним видозмінам. Але основна ідея Гріффітса досі залишається основою розуміння міцності скла. За Гріффітсом руйнування не відбувається до тих пір, поки запасу пружної енергії недостатньо для покриття різниці між пружною енергією, яка вивільняється, і енергією, необхідною для створення нової поверхні при руйнуванні. На жаль, до сих пір існують великі сумніви з питання про оцінювання поверхневої енергії скла за кімнатної температури. Більш того, немає скільки-небудь точних даних про глибину і радіусі вершини тріщин, а також про їх розподіл. У кількісних розрахунках теорії мікротріщин Гріффітса ці характеристики розглядаються як якісь «вільні» і невизначені параметри. Заздалегідь рідко можна бути впевненим в тому, що для даної партії скла є дійсно вірною та чи інша статистична закономірність.

Тому для оцінювання реальної міцності виробів, що містять, наприклад, скляні частини і вузли, необхідне накопичення статистичного матеріалу з метою визначення довірчих інтервалів і статистичних закономірностей, визначення найбільш типових дефектів і концентраторів напружень. Оцінювання величини небезпечних напружень, що можуть призвести до руйнування скла, при цьому здійснюється за формулою Гріффітса [26]

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}}, \quad (1.1)$$

де σ_e – границя міцності; E – модуль пружності 1-го роду; γ – коефіцієнт поверхневого натягу. В випадках крихкого руйнування поверхнева енергія ототожнюється з поверхневим натягом матеріалу, аналогічним поверхневому

натягу рідини [26]; μ – коефіцієнт Пуассона; c – половина довжини тріщини, розташованої перпендикулярно до напрямку розтягування.

Для зменшення концентрації напружень, створюваних дефектами, використовуються різні методи: травлення поверхні скла плавиковою кислотою, «залізування» поверхні скла за допомогою вогневого полірування тощо. Механізм цього процесу наочно показаний Проктором [27]. На рис. 1.3 приведено схематичне уявлення цього процесу [24, с. 45, рис. 112]. Можливі й інші шляхи: поліпшення якості випущеного скла або їх контрольний відбір за мінімальними концентраторами напружень.

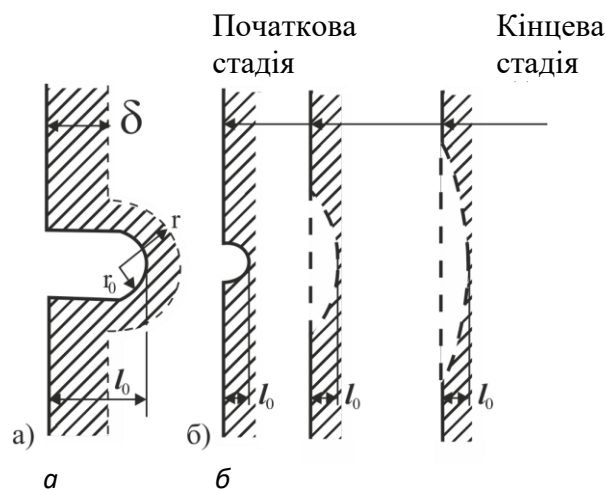


Рис. 1.3 - Збільшення радіусу вершини тріщини за допомогою стравлювання поверхневого шару плавиковою кислотою

З огляду на сказане, зауважимо, що на реальну міцність вузлів і деталей фотодатчиків (ФД), виготовлених з крихких матеріалів (зокрема, скла), впливає значна кількість різноманітних факторів. Це - справжні значення розкиду допусків фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалів, що з'єднуються і розмірів виробів, технологічні напруження, що виникають і накопичуються в вузлах і деталях ФД в процесі їх виготовлення і випробувань, експлуатаційні напруження, що виникають під час роботи виробів, мікрodefекти і нерегулярності матеріалу, процеси старіння тощо. Тому дуже

важливо, виходячи з міркувань надійної роботи конструкції, її механічної цілісності, визначати допустимі напруження $[\sigma]$ для проектованої конструкції, для чого, в свою чергу, необхідно призначити коефіцієнт запасу міцності k .

При призначенні коефіцієнта запасу міцності крім перерахованих факторів враховується недосконалість математичної моделі (її відмінність від реального об'єкта, додаткові невраховані експлуатаційні напруження), призначення виробу, наслідки відмов і економічна сторона питання.

У загальному випадку допустимі напруження для крихких матеріалів визначаються за формулою:

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_g^p}{k}, \quad (1.1)$$

де $[\sigma]_p$ – допустиме напруження при розтягуванні; σ_g^p – границя міцності при розтягуванні; k – коефіцієнт запасу міцності.

У таблиці 1.1 містяться величини, що характеризують міцність різних марок скла для навантажень розтягу і стиску [28, 29]. Коефіцієнт запасу міцності у формулі (1.1) може бути визначений таким чином:

$$k = \frac{k_\sigma \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{\varepsilon_g}, \quad (1.2)$$

де k_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень; k_1 – коефіцієнт, що враховує точність визначення діючих на деталь зусиль і напружень, а також точність розрахункових схем; k_2 – коефіцієнт, що враховує однорідність матеріалу і якість технології виготовлення деталі; k_3 – коефіцієнт, що враховує підвищення запасу міцності для відповідальної деталі з метою збільшення терміну служби і надійності її в експлуатаційних умовах; ε_g –

масштабувальний фактор-коефіцієнт, що враховує зменшення границі міцності зі збільшенням розмірів деталі.

Таблиця 1.1 - Міцнісні характеристики ковару і деяких марок скла

Матеріал	Модуль пружності $E \times 10^{11}$ Па	Границя міцності при розтягу $\sigma_g^p \cdot 10^5$ Па	Границя міцності при стиску $\sigma_g^{cm} \cdot 10^5$ Па	ТКЛР (при 20...130°C) α , град. ⁻¹	Границя текучості $\sigma_t \cdot 10^5$ Па
Сплав ковар	1,76–1,86	4420–4900	4420–4900	$(45-50) \cdot 10^{-7}$	3780
Сплав 29НК	1,45	–	–	$(46-52) \cdot 10^{-7}$	3780
Скло 3С–5	0,612	294–490	8330	$(49 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	–
Скло 3С–8	0,632	755	10600	$(48 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	–
Скло № 46 молибденове	0,618	887	10700	$(47 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	–
Скло С52–1	0,618	294–882	4900–19600	$(52 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	–

Коефіцієнти, що входять у вираз (1.2) є невідомими, величина їх зазвичай визначається дослідним шляхом. У німецькій електровакуумній промисловості до другої світової війни допустиме напруження на розтяг для скла становило 1/20 від границі міцності. На сьогодні, звичайно, до цієї цифри слід поставитися критично з огляду на більш досконаліх конструкцій і технології виготовлення склоспаїв. Проте, в роботі [26] підкреслюється, що крайові ефекти подвоюють напруження, тому при $\sigma_g^p = 39,2$ МПа, при коефіцієнті запасу міцності $k = 2$ допустимі напруження складають $[\sigma]_p = 9,8$ МПа. Слід зауважити також, що за даними різних авторів величина границі міцності на розтяг і стиск для скла має досить великий розкид значень. Це проілюстровано у даних таблиці 1.2.

Крім того, як показують дані таблиці 9.4 [11], для однієї і тієї ж марки скла ці дані також мають істотний розкид. Як наслідок, звідси впливають і різні значення величин допустимих напружень, а отже, і коефіцієнтів запасу міцності. Ця ж думка міститься і в роботі [32], автори якої підкреслюють, що для спаїв скла зі склом і скла з металом поки не встановлено точних значень

допустимих напружень. Тому при призначенні коефіцієнтів запасу міцності для реальних конструкцій в кожному конкретному випадку необхідно брати до уваги вже перераховані вище фактори: призначення виробу, наслідки відмов, економічну сторону питання, недосконалість математичної моделі, експлуатаційні фактори тощо. Так наприклад, в американській промисловості прийнятий коефіцієнт запасу міцності для скла $k = 3-3,2$.

Таблиця 1.2 - Границя міцності скла за даними різних авторів

Джерело	Межа міцності при розтягуванні $\sigma_g^p \times [10^5 \text{ Па}]$
[33]	200
[24]	392,3
[35]	800–1000
[35]	2100 (термічно закалене)
[36]	294–882,6

Таблиця 1.3 - Значення міцності деяких марок скла за даними різних авторів

Марка скла	Модуль Юнга $[10^{11} \text{ Па}]$	Максимальна міцність $[10^5 \text{ Па}]$
	0,68	245–270
Волоконне	0,83	270–294
Фоточутливе	0,68	245–270
Свинцеве	0,59	245–270
Телевізійне	0,69	245–270
Свинцево-цинковоратне емалей)	(для 0,49	98–147

З огляду на сказане, можна зробити висновок про те, що в більшості випадків величина коефіцієнта запасу міцності повинна знаходитися в межах $k = 2,5 - 3,5$.

На рис. 1.4 у роботі [11] показані графічні залежності σ_g^p від розмірів тріщин і дефектів скла і відповідні значення допустимих напружень $[\sigma]_p$ при різних коефіцієнтах запасу міцності. Наведені залежності використання при розрахунку скла фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-8, СФ-3-12, СФ-2-16, ФРЗ-11 можуть бути практично використані конструкторами і технологами при оцінюванні міцності продукції, що випускається, а також проєктованих виробів інших марок і призначень. Оцінювання міцності скляних, компаундованих вузлів і деталей повинне проводитися при цьому за першою теорією міцності незалежно від типу напруженого стану.

Висновки до першого розділу. Постановка задач дослідження

Проведений аналіз сучасного стану технологій виготовлення металоскляних спаїв та їх застосування в електроніці, методів дослідження міцності та недопущення руйнування та загальні підходи до підвищення міцнісної надійності виробів РЕА зі склоспаями дав змогу сформулювати невирішені задачі.

1. Виявити причини проблем міцності бусинкових і вікончатих склоспаїв фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11.

2. Проаналізувати розкид значень ФМХ матеріалів при створенні РЕА і дослідити його можливий вплив на збільшення напружень.

3. Проаналізувати температурні напруження при індукційному способі склоспаювання і обґрунтувати межі його використання в залежності від перепад радіуса між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла.

4. Встановити зв'язок між експлуатаційними умовами, за яких виникають перепади тиску навколишнього середовища, і виникненням додаткових напружень у вузлах і деталях фотодатчиків.

5. Удосконалити методику визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних

установках та методику визначення температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу.

6. Розвинути енергетичний підхід Гріффітса для розрахунку небезпечних руйнівних напружень, відповідних мінімальної і максимальної довжині мікротріщин скла.

7. Визначити сумарні напруження в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів впливу на міцність виробів.

8. Обґрунтувати вибір тензометричної та іншої вимірювальної апаратури для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків.

9. Розробити комплексну методику тензометрування металоскляних фотодатчиків, у тому числі при висотних випробуваннях з використанням вакуумної установки.

10. Експериментально визначити напруження, що виникають і накопичуються у корпусах фотодатчиків під час їх виготовлення.

11. Експериментально дослідити вплив перепаду атмосферного тиску на внутрішні напруження корпусів фотодатчиків.

12. Перевірити експериментально ефективність розроблених теоретичних методів розрахунку сумарних напружень і контактних тисків у вікончастих і бусинкових склоспаях, обумовлених конструкторськими, технологічними та експлуатаційними чинниками.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

2.1 Розрахунок на міцність фотодатчиків. Визначення внутрішніх напружень у корпусах

2.1.1 Напруження в склі фотодатчиків при одночасній дії тиску і температури. Фотодатчики СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-9, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11 (рис. 2.1) є мікроприладами РЕА, що змінюють свої електричні параметри в залежності від освітленості навколишнього середовища або певної інтенсивності світлового потоку, що реєструють наявність випромінювання певної довжини хвилі.



Рис. 2.1 - ФД і їх закордонні аналоги

Корпус такого мікроприладу являє собою порожнистий металевий циліндр, усередині якого знаходяться чутливі елементи. Загальний вигляд ФД показаний

на рис. 2.2. Верхнє днище корпусу мікроприладу є круглою прозорою пластинкою, виготовленою зі скла С52-1. Нижнє днище - металеве, що містить виводи через бусинковий склоспай. Виводи, нижнє днище і корпус ФД виготовлені зі сплаву «ковар» 29НК. На рис. 2.3 показані габаритні розміри верхньої частини корпусу ФД, що містить вікончастий склоспай.

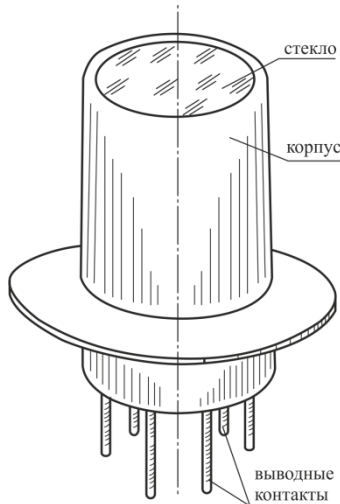


Рис. 2.2 - Загальний вигляд ФД

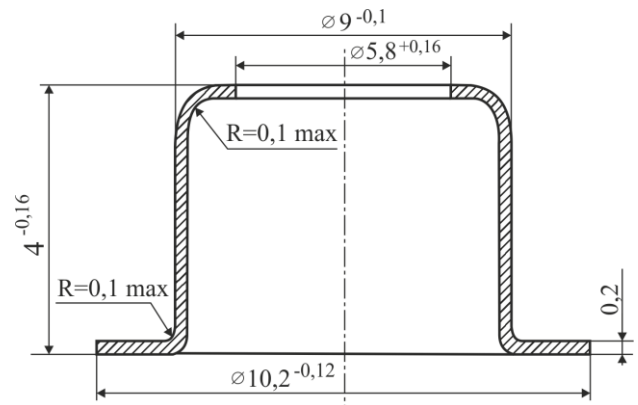


Рис. 2.3 - Габаритні розміри кришки корпусу ФД

1. Для подальшого дослідження були використані результати, отримані в роботі [11], згідно яких для розрахунку напружень у виробках РЕА циліндричної форми, зокрема, в вікончастих і бусинкових склоспаях, обґрунтовано можливість застосування теорії складових циліндрів Ляме. За викладеною в п. 9.2.1-9.2.7 [11] теоретичної методикою були визначені внутрішні напруження, що виникають і накопичуються в вузлах і деталях розглянутих вище датчиків під час технологічного процесу їх виготовлення, а також в процесі експлуатації. Згідно розрахункової схеми прийняли наступні розміри і позначення: $r_1 = 0$, $r_2 = R_1 = 5,8$ мм, $R_2 = 9$ мм. У розрахунках використано наступні величини ФМХ матеріалів, що з'єднуються:

– для скла С52–І (ОСТ–ІІ ПО 735 002–73): температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) $\alpha_C = (46–52) \cdot 10^{-7}$ 1/град; модуль Юнга $E_C = (0,49–0,64) \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнт Пуассона $\mu_C = 0,24–0,36$;

– для металу (ковар 29НК, ГОСТ 14080–78): ТКЛР $\alpha_M = (46–48) \cdot 10^{-7}$ 1/град.; модуль Юнга $E_M = (1,47+1,86) \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнт Пуассона $\mu_M = 0,84–0,32$.

При постійній температурі по радіусу виробу для розрахунку контактного тиску використовувалися вирази з таблиці 2.1. Контактний тиск було визначено для постійної температури $T = 20^\circ\text{C}$ і $T = 400^\circ\text{C}$ при номінальних значеннях ФМХ скла і коvara, а також для випадків, коли за значення цих характеристик брали величини, відповідні границям допусків. Результати розрахунків і самі розрахунки наведені в таблиці 2.1.

У таблиці 2.2 міститься розрахунок контактного тиску в вікончатому вузлі корпусу ФД для випадків, коли температура по радіусу скляної частини виробу змінювалася за лінійним законом і за законом квадратичної параболи, а по радіусу металевої частини лишалася незмінною. Для цього використовувалися відповідні вирази з таблиці 2.1. Оскільки для всіх перерахованих випадків розподілу температури по радіусу $\sigma_T = -q$, то результати табл. 2.1, 2.2 дають змогу безпосередньо говорити про величину виниклих у виробі напружень. У табл. 2.3 містяться результати розрахунків даних таблиць 2.1 і 2.2.

Так, за даними таблиці 2.3 видно, що при постійній температурі $T = 20^\circ\text{C}$ напруження знаходяться в межах $\sigma = -23,78...+4,606$ МПа, що не повинно призводити до руйнування. Практика, проте, показує, що у значній кількості випадків відбувається розгерметизація корпусів ФД, викликана розтріскуванням скляних вікончатих пластин під впливом залишкових внутрішніх напружень. Для оцінювання величини цих напружень необхідно враховувати, за яким законом розподілялася температура по радіусу виробу в

процесі охолодження від температури плавлення $T_{пл} = 585^\circ\text{C}$ до кімнатної температури. Як відомо, при зміні температури змінюються і величини ФМХ матеріалів. Так, в роботі [37, с. 31, рис. 13] показано, що до температури $T=400^\circ\text{C}$ α можна вважати постійним (див. рис. 2.4). Хоча в таблицях 2.1 і 2.2 не врахована зміна величин ФМХ при підвищенні температури, однак навіть такий, досить грубий наближений розрахунок показує, що чим більше градієнт зміни температури по радіусу виробу, тим більшими є напруження, що при цьому виникають.

Таблиця 2.1 - Контактні тиски в склоспаї ФД при постійній по радіусу температурі

$\Delta T (\alpha_c - \alpha)$	$P_2 R_2 (2 - \mu_2)$	$E_\mu (R_2^2 R_1^2)$	$\frac{P_2 R_2^2 (2\mu_c)}{E_\mu (R_2^2 - R_1^2)}$	(1)+(4)	$\frac{1 - 2\mu_c}{E_c}$	$(1 - 2\mu_\mu) R_1^2$	$(1 + \mu_\mu) R_2^2$	(7)+(8)	$\frac{(9)}{(3)}$	(6)+(10)	$q = \frac{(5)}{(11)}$
$T = 20^\circ\text{C} = \text{const}$											
С – ном, М – ном											
$113 \cdot 10^{-6}$	1,377	$0,805 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$	$114,7 \cdot 10^{-6}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,1345	1,053	1,1876	$1,475 \cdot 10^{-6}$	$2,368 \cdot 10^{-6}$	48,44
С – max, М – min											
$339 \cdot 10^{-6}$	1,393	$0,71 \cdot 10^{-6}$	$1,962 \cdot 10^{-6}$	$340,9 \cdot 10^{-6}$	$0,738 \cdot 10^{-6}$	0,148	1,037	1,1848	$1,6687 \cdot 10^{-6}$	$2,407 \cdot 10^{-6}$	140,6
С – min, М – max											
$-113 \cdot 10^{-6}$	1,3608	$0,8998 \cdot 10^{-6}$	$1,512 \cdot 10^{-6}$	$111,5 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	0,1211	1,0632	1,1903	$1,323 \cdot 10^{-6}$	$2,363 \cdot 10^{-6}$	-47,18
$T = 400^\circ\text{C} = \text{const}$											
С – ном, М – ном											
$37 \cdot 10^{-6}$	1,377	$0,805 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$	$38,71 \cdot 10^{-6}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,1345	1,053	1,1875	$1,415 \cdot 10^{-6}$	$2,368 \cdot 10^{-6}$	16,35
С – max, М – min											
$111 \cdot 10^{-6}$	1,353	$0,71 \cdot 10^{-6}$	$1,962 \cdot 10^{-6}$	$112,98 \cdot 10^{-6}$	$0,138 \cdot 10^{-6}$	0,148	1,037	1,1848	$1,6687 \cdot 10^{-6}$	$2,407 \cdot 10^{-6}$	46,93
С – min, М – max											
$-37 \cdot 10^{-6}$	1,3608	$0,8998 \cdot 10^{-6}$	$1,512 \cdot 10^{-6}$	$355 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	0,1211	1,0692	1,1903	$1,323 \cdot 10^{-6}$	$2,363 \cdot 10^{-6}$	-15,02

Таблиця 2.2 - Контактні тиски в склоспаї ФД при температурі, що лінійно і параболічно змінюється по радіусу

$\frac{\alpha_c}{3}(2T_2 + T_1)$	$\alpha_{\mu} T_{r2}$	$P_2 R_2^2 (2 - \mu_{\mu})$	$E_{\mu} (R_2^2 - R_1^2)$	(3) (4)	(1)– – (2)+(5)	$\frac{1 - 2\mu_c}{E_c}$	$(1 - 2\mu_{\mu}) \times R_1^2$	$(1 + \mu_{\mu}) \times R_2^2$	(8)+(9)	(10) (4)	(7)+(11) ()	$q = \frac{(6)}{(12)}$
<i>Лінійний закон зміни</i>												
С – ном, М – ном												
1521,1·10 ⁻⁶	809,510 ⁻⁶	1,377	0,805·10 ⁻⁶	1,71·10 ⁻⁶	659,3·10 ⁻⁶	0,893·10 ⁻⁶	1,13456	1,053	1,1876	1,475·10 ⁻⁶	2,368·10 ⁻⁶	278,4
С – max, М – min												
1020,6·10 ⁻⁶	851·10 ⁻⁶	1,393	0,71·10 ⁻⁶	1,962·10 ⁻⁶	771,6·10 ⁻⁶	0,738·10 ⁻⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁻⁶	2,407·10 ⁻⁶	320,6
С – min, М – max												
1434·10 ⁻⁶	732·10 ⁻⁶	1,3608	0,8998·10 ⁻⁶	1512·10 ⁻⁶	0,73,5·10 ⁻⁶	1,04·10 ⁻⁶	0,1211	1,0692	1,1903	1,3228·10 ⁻⁶	2,363·10 ⁻⁶	273,1
<i>Температура по склу змінюється за законом параболі</i>												
С – ном, М – ном												
1837,5·10 ⁻⁶	869,5·10 ⁻⁶	11,377	0,805·10 ⁻⁶	1,71·10 ⁻⁶	969,7·10 ⁻⁶	0,893·10 ⁻⁶	0,13456	1,053	1,1876	1,475·10 ⁻⁶	2,368·10 ⁻⁶	409,5
С – max, М – min												
1950·10 ⁻⁶	851·10 ⁻⁶	1,399	0,71·10 ⁻⁶	1,962·10 ⁻⁶	1009·10 ⁻⁶	0,738·10 ⁻⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁻⁶	2,407·10 ⁻⁶	457,4
С – min, М – max												
1725·10 ⁻⁶	792·10 ⁻⁶	1,3608	0,8998·10 ⁻⁶	1,512·10 ⁻⁶	944,5·10 ⁻⁶	1,04·10 ⁻⁶	0,1211	1,0692	1,1903	1,3228·10 ⁻⁶	2,363·10 ⁻⁶	399,7

Таблиця 2.3 - Значення радіальних напружень і їх розкид при різних законах зміни температури по радіусу

Значення ФМХ	Закон зміни температури			
	$T = 20^\circ$ $C = \text{const}$	$T = 400^\circ$ $C = \text{const}$	лінійний, $T_0 = 20^\circ\text{C}, T_R = 400^\circ\text{C}$	Квадратичної параболи, $T_0 = 20^\circ\text{C}, T_R = 400^\circ\text{C}$
При ном.-них значення ($\alpha, E,$ μ) $\sigma_r = -q$	$-47 \cdot 10^5$ Па	$-16 \cdot 10^5$ Па	$-272,8 \cdot 10^5$ Па	$-401,3 \cdot 10^5$ Па
Розкид значень (α, E, μ) $\sigma_r = -q$	$[-137,8 \dots +46,2] \times$ $\times 10^5$ Па	$[-45,9 \dots +14,7] \times$ $\times 10^5$ Па	$[-268 \dots -314] \times$ $\times 10^5$ Па	$[-392 \dots -448] \times$ $\times 10^5$ Па

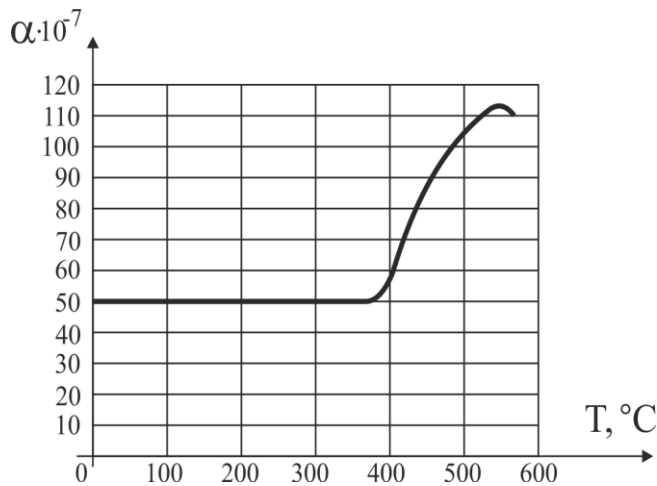


Рис. 2.4 - Залежність ТКЛР скла від температури [32, с. 31]

Оскільки ТКЛР змінюється в залежності від температури $\alpha = \alpha(T)$, був зроблений розрахунок контактної тиску q в вікончатому склоспаї, що враховує цю зміну. Для кожного інтервалу температури $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ по графіку (рис. 2.4), нами приймалося усереднене, відповідне цьому інтервалу значення α .

Сумарна величина контактної тиску (при номінальних значеннях інших ФМХ), отримана зазначеним чином, $q = 54,12 \cdot 10^5$ Па, тобто відрізняється від результату, отриманого без урахування зміни $\alpha = \alpha(T)$, на 14 % (табл. 2.3, $T = 20^\circ\text{C} = \text{const}$).

У той же час за даними таблиці видно, що контактні тиски, розраховані без урахування зміни КТЛР, але з урахуванням розкиду значень ФМХ, знаходяться в ширших межах: $-13,779 \dots +4,625$ МПа, тобто можуть відрізнятися від номінальних значень на 19,8 % і мати протилежний знак.

2.1.2 Контактні тиски, радіальні, окружні і осьові напруження в бусинкових склоспаях. На підставі методики, викладеної в п. 9.2.1 [11], проводився розрахунок напружень в бусинкових склоспаях. Оскільки радіус внутрішнього циліндра $r_1 = 0$, а також $P_1 = 0$, перетворюючи формули (9.61) [11] і враховуючи, що внутрішній і зовнішній циліндри - металеві, а середній - скляний, отримаємо:

$$Q = \frac{\Delta T(\alpha_m - \alpha_c) + \frac{qR_1^2(2 - \mu_c)}{E_c(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{P_2\rho_2^2(2 - \mu_m)}{E_m(\rho_2^2 - \rho_1^2)}}{\frac{(1 - 2\mu_c)R_2^2 + (1 + \mu_c)R_1^2}{E_c(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{(1 - 2\mu_m)\rho_1^2 + (1 + \mu_m)\rho_2^2}{E_m(\rho_2^2 - \rho_1^2)}},$$

$$q = \frac{\Delta T(\alpha_m - \alpha_c) + \frac{QR_2^2(2 - \mu_c)}{E_c(R_2^2 - R_1^2)}}{\frac{1 - 2\mu_m}{E_m} + \frac{(1 - 2\mu_c)R_1^2 + (1 + \mu_c)R_2^2}{E_c(R_2^2 - R_1^2)}}. \quad (2.1)$$

Для розрахунків використані наступні вихідні дані: $r_1 = 0$, $R_1 = r_2 = 0,051$ см, $R_2 = \rho_1 = 0,177$, $\rho_2 = 0,7$ см (див. рис. 9.4).

Значення ФМХ для скла С52-1 і ковара 29НК наведені в п. 9.3.1 [11].

При визначенні напружень в скляній частині бусинкового склоспая використано формули, за якими визначено радіальні, окружні і осьові напруження. Перетворюючи вирази, отримаємо (при постійній температурі по радіусу):

– на внутрішній поверхні

$$\sigma_{R_{R_1}} = -q; \quad \sigma_{t_{R_1}} = 2 \frac{qR_1^2 - QR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad \sigma_z = \frac{qR_1^2 - QR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad (2.2)$$

– на зовнішній поверхні

$$\sigma_{R_{R_2}} = -Q; \quad \sigma_{t_{R_2}} = 2 \frac{qR_1^2 - QR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad \sigma_z = \frac{qR_1^2 - QR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (2.3)$$

Розрахунок напружень в скляній частині бусинкового склоспаю проводився для двох випадків постійної температури по радіусу виробу: $T = 20^\circ\text{C}$ і $T = 400^\circ\text{C}$. При цьому значення ФМХ матеріалів, що з'єднуються приймалися наступними:

1. Номінальними значеннями для скла та для металу.
2. Для скла - мінімальними з усіх можливих значень, для металів - максимальними.

Для скла - максимальними з усіх можливих значень допуску, для металу - мінімальними. Розрахунки контактних тисків, радіальних, окружних і осьових напружень у всіх розглянутих випадках зведені в табл. 2.4. Як показує аналіз даних, що містяться в ній, значення радіальних, окружних і осьових напружень на зовнішній і внутрішній поверхнях бусинкового склоспаю можуть перебувати в досить широкому діапазоні значень, змінюючись при цьому і за величиною і за знаком. При цьому величина напружень може перевищити допустимі значення $[\sigma]_p$ для скла, що призведе до руйнування скляної частини ФД, розгерметизації і виходу з ладу виробу в цілому.

За викладеною методикою був проведений розрахунок бусинкових склоспаїв, які розрізняються геометрією і матеріалом своїх елементів.

1. Спаї першого типу виготовляються з дроту марки 29НК-08 і оправлення ПЮ.8.224.696 (рис. 2.5, а).
2. Спаї другого типу виготовляються з дроту марки 29НК-1 і оправлення ВА8.223.729 (рис. 2.5, б).
3. Спаї третього типу виготовляються з дроту марки 29НК-08 і оправлення ГК8.030.869 (рис. 2.5, в).

Таблиця 2.4 - Фотодатчики СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11

$\frac{(1-2\mu_c)\rho_1^2+(1+\mu_i)\rho_2^2}{\dot{A}_i(\rho_2^2-\rho_1^2)}$	$\frac{R_1^2(2-\mu_c)}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\frac{P_2\rho_2^2(2-\mu_i)}{\dot{A}_i(\rho_2^2-\rho_1^2)}$	$\frac{(1-2\mu_c)R_2^2+(1+\mu_i)R_1^2}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\frac{R_2^2(2-\mu_c)}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\frac{1-2\mu_i}{\dot{A}_i}$				
1	2	3	4	5	6				
$T = 20\text{ }^\circ\text{C} = \text{const}, \Delta T = 565\text{ }^\circ\text{C}$									
Номінальне значення ФМХ									
$0,8329 \cdot 10^{-6}$	$0,2829 \cdot 10^{-6}$	$1,0683 \cdot 10^{-6}$	$1,1756 \cdot 10^{-6}$	$3,4017 \cdot 10^{-6}$	$0,2353 \cdot 10^{-6}$				
Скло – min, метал – max									
$0,7551 \cdot 10^{-6}$	$0,310 \cdot 10^{-6}$	$0,9446 \cdot 10^{-6}$	$1,3686 \cdot 10^{-6}$	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$0,1894 \cdot 10^{-6}$				
Стекло – max, метал – min									
$0,9316 \cdot 10^{-6}$	$0,2423 \cdot 10^{-6}$	$1,2249 \cdot 10^{-6}$	$0,9607 \cdot 10^{-6}$	$2,9192 \cdot 10^{-6}$	$0,2933 \cdot 10^{-6}$				
$\frac{(1-2\mu_c)R_1^2+(1+\mu_i)R_2^2}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\Delta T(\alpha_M - \alpha_c)$	$\times 10^5 \text{ Па}$							
		q	Q	$\sigma_{R_{R1}}$	$\sigma_{I_{R1}}$	$\sigma_{z_{R1}}$	$\sigma_{R_{R2}}$	$\sigma_{I_{R2}}$	$\sigma_{z_{R2}}$
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$T = 20\text{ }^\circ\text{C} = \text{const}, \Delta T = 565\text{ }^\circ\text{C}$									
Номінальне значення ФМХ									
$2,515 \cdot 10^{-6}$	$-113 \cdot 10^{-6}$	-130,8	-73,0	+130,8	135,7	67,88	73,0	135,7	67,88
Стекло – min, метал – max									
$2,7985 \cdot 10^{-6}$	$+113 \cdot 10^{-6}$	123,5	71,3	-128,5	-132,4	-66,15	-71,3	-132,5	-66,15
Скло – max, метал – min									
$2,1807 \cdot 10^{-6}$	$-339 \cdot 10^{-6}$	-398	-223,5	398	411,6	205,8	223,5	411,6	205,8
$\frac{(1-2\mu_c)\rho_1^2+(1+\mu_i)\rho_2^2}{\dot{A}_i(\rho_2^2-\rho_1^2)}$	$\frac{R_1^2(2-\mu_c)}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\frac{P_2\rho_2^2(2-\mu_i)}{\dot{A}_i(\rho_2^2-\rho_1^2)}$	$\frac{(1-2\mu_c)R_2^2+(1+\mu_i)R_1^2}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\frac{R_2^2(2-\mu_c)}{\dot{A}_c(R_2^2-R_1^2)}$	$\frac{1-2\mu_i}{\dot{A}_i}$				
1	2	3	4	5	6				
$T = 20\text{ }^\circ\text{C} = \text{const}, \Delta T = 565\text{ }^\circ\text{C}$									
Номінальне значення ФМХ									
$0,8329 \cdot 10^{-6}$	$0,2829 \cdot 10^{-6}$	$1,068 \cdot 10^{-6}$	$1,1756 \cdot 10^{-6}$	$3,4017 \cdot 10^{-6}$	$0,2353 \cdot 10^{-6}$				
Скло – min, метал – max									
$0,7551 \cdot 10^{-6}$	$0,310 \cdot 10^{-6}$	$0,9446 \cdot 10^{-6}$	$1,3686 \cdot 10^{-6}$	$3,83 \cdot 10^{-6}$	$0,1894 \cdot 10^{-6}$				
Стекло – max, метал – min									
$0,9316 \cdot 10^{-6}$	$0,2923 \cdot 10^{-6}$	$1,2249 \cdot 10^{-6}$	$0,9807 \cdot 10^{-6}$	$2,9192 \cdot 10^{-6}$	$0,2933 \cdot 10^{-6}$				

Продовження таблиці 2.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\frac{(1-2\mu_c)R_1^2 + (1+\mu_i)R_2^2}{\dot{A}_c(R_2^2 - R_1^2)}$	$\Delta T(\alpha_m - \alpha_c)$	$\times 10^5 \text{ Па}$													
		q	Q	$\sigma_{R_{R_1}}$	$\sigma_{I_{R_1}}$	$\sigma_{c_{R_1}}$	$\sigma_{R_{R_2}}$	$\sigma_{I_{R_2}}$	$\sigma_{c_{R_2}}$						
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16						
$T = 400 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}, \Delta T = 185 \text{ }^\circ\text{C}$															
Номінальне значення ФМХ															
$2,515 \cdot 10^{-6}$	$-37 \cdot 10^{-6}$	-42,27	-23,47	42,27	43,58	21,8	23,47	43,58	21,8						
Скло – min, метал – max															
$2,7985 \cdot 10^{-6}$	$37 \cdot 10^{-6}$	42,27	23,7	-42,47	-44,06	-22,03	-23,7	-440,6	-22,03						
Скло – max, метал – min															
$2,1807 \cdot 10^{-6}$	$-111 \cdot 10^{-6}$	-129,6	-72,7	129,6	135,1	67,6	72,7	135,1	67,6						

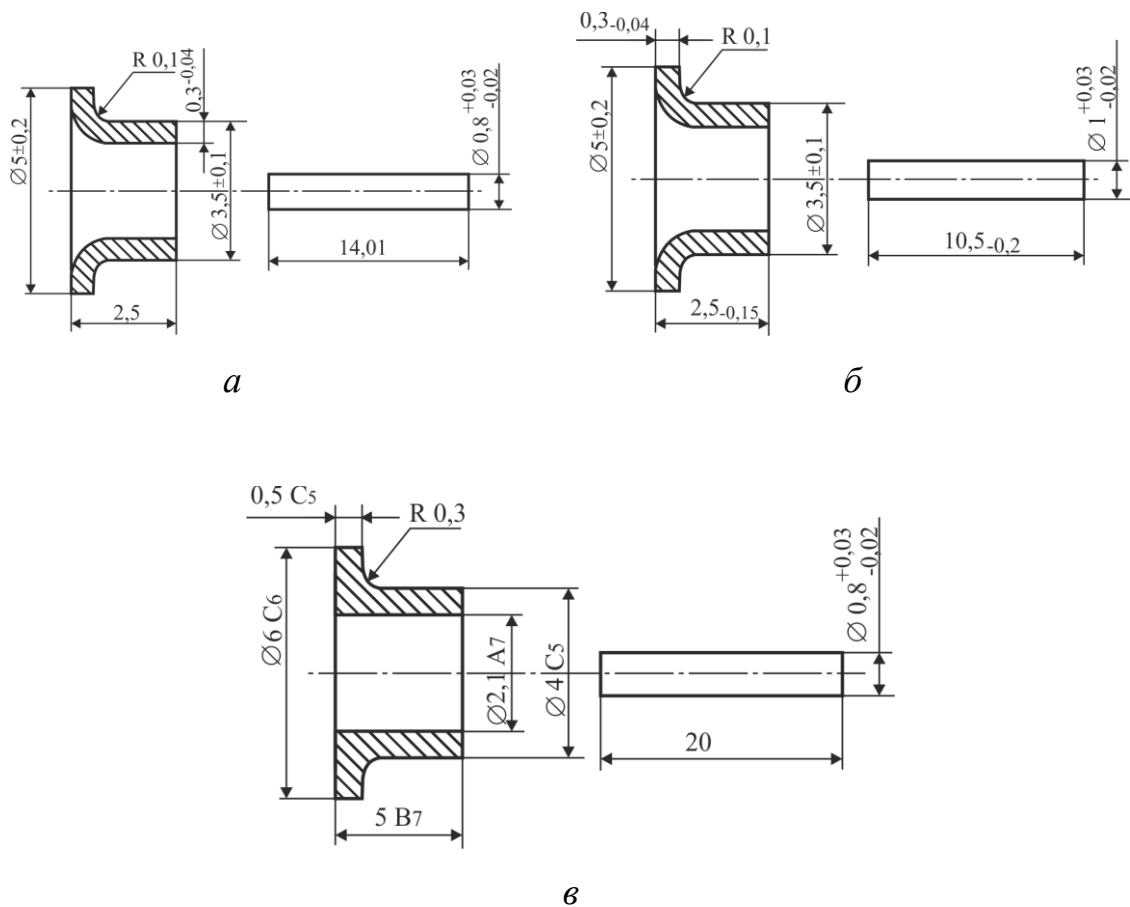


Рис. 2.5 - Дріт і оправлення, що застосовуються для спаїв

Для всіх трьох спаїв виробів використовуються бусинки, виготовлені зі скла двох марок С48-2 і С52-1. Характеристики матеріалів (сплаву марки 29НК і скла марки С49-2 і С52-1) наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Фізико-механічні характеристики матеріалів

Матеріал	Модуль пружності $E \cdot 10^{11}$			Коефіцієнт Пуассона μ			ТКЛР $\alpha (10^{-6} \text{ град.}^{-1})$		
	Па			min	max	середнє	min	max	середнє
	min	max	середнє						
Сплав 29НК	1,47	1,86	1,66	0,28	0,32	0,3	5,9	6,4	6,2
Скло С48-2	0,49	0,64	0,56	0,24	0,26	0,25	4,7	5,0	4,8
Скло С52-1	0,49	0,64	0,57	0,24	0,26	0,25	5,1	5,4	5,2

Оскільки величини контактних тисків, а отже, і напружень залежать від різниці коефіцієнтів лінійного розширення $\Delta\alpha$, то для кожної конструкції розрахунок проводиться для трьох значень $\Delta\alpha$ при постійних (середніх) значеннях μ , E і радіусів:

$$\Delta\alpha_{\min} = \alpha_{\text{м}}^{\min} - \alpha_{\text{с}}^{\max}, \quad \Delta\alpha_{\max} = \alpha_{\text{м}}^{\max} - \alpha_{\text{с}}^{\min}, \quad \Delta\alpha_{\text{ном}} = \alpha_{\text{м}}^{\text{ном}} - \alpha_{\text{с}}^{\text{ном}}. \quad (2.4)$$

Величини $\Delta\alpha$ для скла марки С48-2 і С52-1 і сплаву 29НК зведені в таблиці 2.6. За формулами для розрахунку трьохшарового циліндру (9.63) - (9.64) [11], приймаючи до уваги (9.69) - (9.71) [11], визначені контактні тиски q і Q , а також напруження в скляній частині виробів. Напруження визначені для випадку, коли температура є постійною по радіусу всього виробу $T = \text{const} = 20^\circ\text{C}$. В таблиці 2.6 містяться величини контактних тисків в залежності від $\Delta\alpha$, в таблиці 2.7 – радіальних і окружних напружень.

Таблиця 2.6 - Різниця ТКЛР скла і коvara

Марка скла	$\Delta\alpha_{\min} \times 10^{-6} \text{ град.}^{-1}$	$\Delta\alpha_{\max} \times 10^{-6} \text{ град.}^{-1}$	$\Delta\alpha_{\text{ном}} \times 10^{-6} \text{ град.}^{-1}$
С52-1	$5,9 - 5,35 = 0,55$	$6,4 - 5,1 = 1,3$	$6,15 - 5,2 = 0,95$
С48-2	$5,9 - 5,0 = 0,9$	$6,4 - 4,7 = 1,7$	$6,15 - 4,8 = 1,35$

Таблиця 2.7 - Контактні тиски в різних типах бусиноквих спаїв

Номер конструкції	Тиск	Марка скла											
		C52-1						C48-2					
		q ($\Delta\alpha_{\min}$)	\bar{Q} ($\Delta\alpha_{\min}$)	q ($\Delta\alpha_{\max}$)	\bar{Q} ($\Delta\alpha_{\max}$)	q ($\Delta\alpha_{\text{ном}}$)	\bar{Q} ($\Delta\alpha_{\text{ном}}$)	q ($\Delta\alpha_{\min}$)	\bar{Q} ($\Delta\alpha_{\min}$)	q ($\Delta\alpha_{\max}$)	\bar{Q} ($\Delta\alpha_{\max}$)	q ($\Delta\alpha_{\text{ном}}$)	\bar{Q} ($\Delta\alpha_{\text{ном}}$)
1	10 ⁵ Па	24,8	-72,4	57,2	-172,3	42	-125,7	39,9	-119,1	74,4	-225,6	59,9	-179
2		23,6	-68,9	54,4	163,9	40	-119,6	38	-152,4	70,9	-214,6	56,5	-170,3
3		-56	-131,6	-132,8	-311,3	-96,9	-227,4	-91,9	-215,5	-173,7	-407,2	-137,9	-323,3

Аналіз даних таблиць 2.6 і 2.7 показує, що у всіх трьох випадках в розглянутих конструкціях значення як контактних тисків на границях матеріалів, так і напружень в елементах конструкції є більшими при використанні скла марки C48-2, ніж при використанні скла марки C52-1. Тому запас міцності елементів конструкції є більшим в останньому випадку.

Таблиця 2.8 - Напруження в різних типах бусиноквих спаїв

№ п/п	Номер конструкції	Тиск	Марка скла											
			C52-1						C48-2					
			σ_t			σ_r			σ_t			σ_r		
			$\Delta\alpha_{\text{ном}}$	$\Delta\alpha_{\text{max}}$	$\Delta\alpha_{\text{min}}$	$\Delta\alpha_{\text{ном}}$	$\Delta\alpha_{\text{max}}$	$\Delta\alpha_{\text{min}}$	$\Delta\alpha_{\text{ном}}$	$\Delta\alpha_{\text{max}}$	$\Delta\alpha_{\text{min}}$	$\Delta\alpha_{\text{ном}}$	$\Delta\alpha_{\text{max}}$	$\Delta\alpha_{\text{min}}$
1	Границя бусинки і вивода	10 ⁵ Па	-223,2	-306,5	-127,9	-42	-181,8	-24,8	-318	-401,8	-211,3	-59,3	-74,4	-39,9
	Границя бусинки і оправки		-139,5	-191,8	-80,3	-125,7	-172,4	-72,4	-198,7	-250,5	-132,1	-179	-225,6	-119,1
2	Границя бусинки і вивода	10 ⁵ Па	-220,6	-303	-126,3	-40	-54,4	-23,6	-314,8	-397,2	-208,8	-56,5	-70,9	-38
	Границя бусинки і оправки		-137	-193,5	-81,1	-119,6	-163,9	-68,9	-200,9	-253,4	-133,5	-170,3	-241,6	-113,2
3	Границя бусинки і вивода	10 ⁵ Па	-662	-306,2	-382,9	96,9	132,8	56	-941,1	-118,5	-627,1	13709	173,7	91,9
	Границя бусинки і оправки		-337,6	-462,1	-195,3	-227,4	-311,3	-131,6	-479,9	-604,4	-319,8	-323,3	-407,2	-215

2.1.3 Колові напруження в кришках корпусів фотодатчиків. По викладеним методикам розрахунковим шляхом були визначені окружні напруження σ_t в кришках перерахованих ФД. Оскільки в розглянутих виробих товщина стінки корпусу дорівнює 0,2 мм, то можна вважати, що температура по радіусу металевго циліндра залишається постійною, тому формули (2.2) - (2.3) набувають при $R = R_2$ наступного вигляду:

$$\sigma_{R_{R_2}} = -P_2; \quad \sigma_{t_{R_2}} = \frac{2R_1^2 q - P_2(R_2^2 + R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2}; \quad \sigma_{z_{R_2}} = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (2.4)$$

Визначення окружних напружень проведено для різних законів зміни температури по радіусу виробу: а) при постійній температурі $T = 20^\circ\text{C}$; б) при постійній температурі $T=400^\circ\text{C}$; в) при лінійному законі зміни температури по радіусу скляної частини і постійної - по радіусу металевої; г) при законі перепаду температури, що змінюється за законом квадратичної параболи по радіусу скляної частини виробу і постійної - по радіусу металевої. При обчисленні $\sigma_{t_{R_2}}$ в розрахункову формулу підставлялися номінальні значення ФМХ і їх значення, відповідні границі розкиду цих характеристик. Для зручності аналізу всі розрахунки подані в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Колові напруження в кришках ФД

Закон зміни температури по радіусу вікончастого склопая і значення ФМХ		Q (табл. 9.7)	$2qR_1^2$	$P_2(R_2^2 + R_1^2)$	$\frac{2qR_1^2 - P_2}{R_2^2 - R_1^2} \times (R_2^2 - R_1^2)$ Гр. 3-гр. 4	$R_2^2 - R_1^2$	$\sigma_{t_{R_2}}$ $\frac{(4)/(5)}{\times 10^5 \text{ à}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
$T = \text{const} = 20^\circ\text{C}$, $\Delta T = 565^\circ\text{C}$	Номінальні значення ФМХ	+48,44	+32,29	1,1464	+31,1436	0,4736	64,4
	Скло – min, метал – max	-47,2	-31,75	1,1464	-32,896	0,4736	-68,1
	Скло – max, метал – min	+140,6	+94,19	1,1464	+93,04	0,4735	192,5

Продовження таблиці 2.8

1	2	3	4	5	6	7	8
$T = \text{const}$ = $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T =$ $185\text{ }^{\circ}\text{C}$	Номінальні значення ФМХ	-14,65	-9,85	1,1464	-10,996	0,4736	-22,7
	Скло – min, метал – max	-44,63	-30,03	1,1464	-31,176	0,4736	-64,5
	Скло – max, метал – min	+13,34	+8,97	1,1464	7,824	0,4736	-16,2
Лінійний закон $T_{r0} =$ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{r2} $=400\text{ }^{\circ}\text{C}$	Номінальні значення ФМХ	+249,9	+168,13	1,1464	166,98	0,4736	345
	Скло – min, метал – max	+246,4	+165,8	1,1464	164,65	0,4736	340,6
	Скло – max, метал – min	+327,5	+220,3	1,1464	219,15	0,4736	453,4
Квадрати чна парабола $T_{r0} =$ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{r2} =$ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$	Номінальні значення ФМХ	+428,7	+288,4	1,1464	287,25	0,4736	594,4
	Скло – min, метал – max	+376,5	+253,3	1,1464	252,15	0,4736	521,7
	Скло – max, метал – min	+470,5	+316,5	1,1464	315,41	0,4736	652,5

Окружні напруження $\sigma_{t_{R2}}$ в кришках ФД можуть перебувати в інтервалі, що охоплює значний діапазон величин в залежності від ФМХ матеріалів і законів зміни температури.

2.1.4 Визначення допустимого розкиду фізико-механічних характеристик з'єднувальних матеріалів. За методикою, викладеної в 9.2.2 [11], був проведений розрахунок допустимого розкиду ФМХ матеріалів, що використовуються при виготовленні реальних виробів. Такими матеріалами є скло С52-1 і сплав ковар 29НК. Величини допустимих напружень приймалися наступними: на розтяг $[\sigma]_p = +9,8$ МПа, на стиск – $[\sigma]_{сж} = -44,1$ МПа. Розрахунок напружень проведено для випадку рівномірного

розподілу перепаду температури по радіусу виробу: $T = \text{const} = 20^\circ\text{C}$.
Результати розрахунків зведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 - Розкид ФМХ

ФМХ	Одиниця вимірювання	Існуючий розкид	Рекомендований розкид
α_c	град. ⁻¹	$(46-52) \cdot 10^{-7}$	$(46-49) \cdot 10^{-7}$
α_m	град. ⁻¹	$(46-48) \cdot 10^{-7}$	$(46-47) \cdot 10^{-7}$
E_c	Па	$(0,5-0,64) \cdot 10^{11}$	$(0,53-0,59) \cdot 10^{11}$
E_m	Па	$(1,47-1,86) \cdot 10^{11}$	$(1,47-1,7) \cdot 10^{11}$
μ_c		0,24–0,26	0,25–0,26
μ_m		0,28–0,32	0,29–0,31

Порівняння отриманих значень допустимого розкиду ФМХ, що забезпечують виконання умови міцності склоспая, з ДСТУ, показує, що отримані розрахунковим шляхом значення перекривають менші, у порівнянні з існуючими, діапазони значень. Отже, використання матеріалів з ФМХ, величина яких знаходиться в області значень, близьких до краю допуску, може призвести до виникнення у виробах руйнівних напружень. Уникнути цього явища можна, наприклад, здійснюючи вхідний контроль ФМХ використовуваних матеріалів з подальшим погодженням партій цих матеріалів.

Отримані в роботі теоретичні результати узгоджуються з висновками [35] про те, що використання скла С52-1 з значеннями ФМХ на верхній межі допуску підвищувало міцність.

2.1.5 Визначення напружень в круглій скляній пластині вікончастого склоспая. Для порівняння результатів, отриманих за різними розрахунковим методикам, були визначені напруження в скляній частині вікончастого вузла кришки ФД. Такий вузол являє собою круглу защемлену

пластину. При постійній температурі по радіусу пластини (цьому випадку відповідає $n = 0$ в формулі (9.91) [11]), отримаємо значення напружень на контурі пластини: $\sigma_{r_R} = \sigma_{t_R} = q = -\frac{\alpha E T_R}{1 - \mu}$.

Результати, отримані за цією спрощеною методикою, містяться в таблиці 2.10. За результатами табл. 2.10 видно, що напруження, одержувані з використанням даної методики, є завжди негативними і за абсолютною величиною значно більшими, ніж напруження, отримані за методикою розрахунку для складових циліндрів. Це пояснюється тим, що спрощена методика, викладена в 9.2.3 [11], не враховує деформації защемлення пластини. Тому використання зазначеної спрощеної розрахункової методики можливо лише тоді, коли защемлення можна з достатнім ступенем точності вважати абсолютно жорстким.

Таблиця 2.10 - Радіальні напруження на зовнішньому контурі вікончатого склоспая, отримані з використанням спрощеної розрахункової методики

ФМХ	Закон зміни температури по радіусу			
	Постійна, $T=20^{\circ}\text{C}=\text{const}$	Постійна, $T=400^{\circ}\text{C}=\text{const}$	Змінюється лінійно ($n = 1$), $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, $T_R = 400^{\circ}\text{C}$	Змінюється за законом квадратичної параболи, $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$, $T_R = 400^{\circ}\text{C}$
Номінальні значення ФМХ σ_r , МПа	-206,2	-67,5	-113,7	-136,8
Розкид ФМХ σ_r , МПа	-172,1...-245,9	-56,3...-80,6	-94,8...-135,2	-1107...-1636

2.2 Результати розрахунку міцності вікончастих та бусинкових склоспаїв за різними методиками

2.2.1 Розрахунок напружень у вікончастих скласпаях. Для порівняння результатів, отриманих за запропонованою в роботі розрахунковою методикою і вже відомим залежностям, проведені розрахунки окружних і радіальних напружень за формулами різних авторів [38]. У всіх формулах: $a = r_1$ – радіус вікончастого склоспаю, $b = R_2$ – радіус металевого циліндра, що охоплює, $\Delta T = T_s = 20^\circ\text{C}$, тобто різницю між температурою склування і нормальною температурою. Розрахунки проведені для скла С52-1 і сплаву 29НК, а також розмірів, відповідних фотодатчиків СФ–2–5, СФ–2–6, СФ–2–8, СФ–2–12, СФ–2–16, ФРЗ–11. Для зручності розрахункові формули і отримані за ним результати зведені в таблиці 2.11.

2.2.2 Розрахунок напружень в бусинкових скласпаях. Для порівняльного оцінювання результатів, одержуваних за запропонованою в роботі розрахунковою методикою і вже відомим залежностям, проведено розрахунок напружень в бусинкових скласпаях ФД перерахованих вище марок. Для зручності формули різних авторів і отримані за цими формулами результати зведені в таблиці 2.11. У формулах таблиці: Q – радіус металічного ввода; b – радіус скляної буси; $\alpha = \frac{a^2}{b^2}(1 - 2\mu_c)$; $\beta = \frac{a^2}{b^2} - 1$; $R = \frac{E_c}{E_m}$.

Аналіз і порівняння отриманих розрахунковим шляхом значень з експериментальними даними, проводиться в експериментальній частині (табл. 2.11).

2.2.3 Аналітичний розрахунок температурного поля при склоспаї вікончастого вузла кришок фотодатчиків на індукційній установці. Відповідно до методики, викладеної в 9.2.4 [11], проведено розрахунок

температурного поля у вікончастому склоспаї корпусів перерахованих ФД при використанні індукційного установи ЛЗ-13 для отримання склоспаїв.

В результаті були отримані наступні залежності:

1) зміни температури по радіусу скляної частини виробу в різні моменти часу ($T = f(r)$ при $t = 0, 1, 3, \dots, 58, 59, 60, 70, 80, 90, 100$ с);

Таблиця 2.11 - Розрахунок вікончастих склоспаїв ФД за різними методиками

Формули і розрахунки
<i>Порицкий Хэлл</i>
$\sigma_r = \sigma_t = \frac{E_i \cdot E_c \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right)}{E_i + E_c \frac{a^2}{a^2} (1 - 2\mu_c) + E_i \left(\frac{a^2}{a^2}\right) (1 - 2\mu_i) \left(\frac{a^2}{a^2} - 1\right)}$ $= \frac{1,7 \cdot 10^6 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{0,58^2}{0,9^2}\right) 565}{0,56 \cdot 10^6 + 0,56 \cdot 10^6 (1 - 2 \cdot 0,25) \frac{0,58^2}{0,9^2} + 1,7 \cdot 10^6 \left(\frac{0,58}{0,9}\right)^2 (1 - 2 \cdot 0,3) \left(\frac{0,9^2}{0,58^2} - 1\right)} = 58,57 \text{ МПа} = 5,74 \text{ МПа}$
<i>А.Б. Сидоров, Л.А. Кулямина</i>
$\sigma_r = \sigma_t = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot E_m \cdot \left[E_m \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right) \cdot (1 + \mu_c) + E_c (1 + \mu_m) \right] \cdot \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right)}{\left[E_m \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right) - E_c \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right) \cdot (E_m + E_c \mu_m - E_m \mu_c) - E_c \left(1 + \frac{a^2}{a^2}\right) \right] - 2 \left[E_m \mu_c \left(1 - \frac{a^2}{a^2}\right) - E_c \mu_m \right]^2}$ $= \frac{0,2 \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^6 \cdot \left[1,9 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{0,9^2}{0,58^2}\right) \cdot (1 + 0,25) + 0,56 \cdot 10^6 (1 + 0,3) \right] \cdot \left(1 - \frac{0,9^2}{0,58^2}\right)}{\left[1,7 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{0,9^2}{0,58^2}\right) - 0,56 \cdot 10^6 \right] \cdot \left[\left(1 - \frac{0,9^2}{0,58^2}\right) \cdot (1,7 \cdot 10^6 + 0,56 \cdot 10^6 \cdot 0,3 - 1,7 \cdot 10^6 \cdot 0,25) - 0,56 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{0,9^2}{0,58^2}\right) \right] - 2 \left[1,7 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \left(1 - \frac{0,9^2}{0,58^2}\right) - 0,56 \cdot 10^6 \cdot 0,3 \right]^2}$ $= 32,77 \text{ кг/см}^2 = 3,21 \text{ МН/м}^2$
<i>Н.В. Соломин</i>
$\sigma_r = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot E_m}{E_m + E_c \frac{a}{b-a}} = \frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 10^6 - 0,56 \cdot 10^6 \frac{0,58}{0,9 - 0,51}} = 39,62 \text{ кг/см}^2 = 3,88 \text{ МН/м}^2$

2) зміни температури з плинном часу в різних точках виробу ($T = f(r)$ при $r = 0+0,58$ см, шаг $\Delta r = 0,01$ см).

При розрахунках використовувалися такі значення коефіцієнтів, що входять у вираз (9.107) [39–44]:

$$\lambda = 0,0025 \text{ кал/см} \cdot \text{с} \cdot \text{град.} = 1,07 \text{ Вт/м} \cdot \text{град.};$$

Таблиця 2.12 - Розрахунок бусинкових склоспаїв ФД за різними методиками

Формули і розрахунки
<i>Порицкий Хэлл</i>
$\sigma_r = \sigma_t = \left(\frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T E_c}{1 + \alpha + \alpha\beta R} \right) \cdot \left(\frac{a^2}{\theta^2} - 1 \right) = \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6}{1 + 0,0415 + 0,0415 \cdot 11,05 \cdot 0,3294} \right) \cdot \left(\frac{0,051^2}{0,177^2} - 1 \right) = -48,35 \text{ кг/см}^2 = -4,74 \text{ МН/м}^2$
<i>А.Б. Сидоров, Л.А. Кулямина</i>
$\sigma_r = \sigma_t = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot E_i \cdot \left[E_i \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right) \cdot (1 + \mu_c) + E_n(1 + \mu_i) \right] \cdot \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right)}{\left[E_i \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right) - E_c \right] \cdot \left[E_i \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right) + \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right) \cdot (E_i \mu_i - E_i \mu_c) - E_c \left(1 + \frac{a^2}{a^2} \right) \right] - 2 \left[E_i \mu_c \left(1 - \frac{a^2}{a^2} \right) - E_i \mu_i \right]} =$ $= \frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^6 \cdot \left[1,7 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{0,177^2}{0,051^2} \right) \cdot (1 + 0,25) + 0,56 \cdot 10^6 (1 + 0,3) \right] \cdot \left(1 - \frac{0,177^2}{0,051^2} \right)}{\left[1,7 \cdot 10^6 \left(1 - \frac{0,177^2}{0,051^2} \right) - 0,56 \cdot 10^6 \right] \cdot \left[(1,71 \cdot 10^6) \cdot \left(1 - \frac{0,177^2}{0,051^2} \right) + \left(1 - \frac{0,177^2}{0,051^2} \right) \cdot (0,56 \cdot 10^6 + 0,56 \cdot 10^6 \cdot 0,3 - 1,7 \cdot 10^6 \cdot 0,25) - 0,56 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{0,177^2}{0,051^2} \right) \right] - 2 \left[1,7 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \left(1 - \frac{0,177^2}{0,051^2} \right) - 0,56 \cdot 10^6 \cdot 0,3 \right]} =$ $= 54,114 \text{ ед/м}^2 = 5,33 \text{ т/м}^2.$
<i>Н.В. Соломин</i>
$\sigma_t = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot E_m}{E_c \left(\frac{\theta}{a} - 1 \right) + E_m} = \frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^6}{0,56 \cdot 10^{-6} \left(\frac{0,177}{0,051} - 1 \right) + 1,7 \cdot 10^{-6}} = 34,89 \text{ кг/см}^2 = 3,42 \text{ МН/м}^2$
<i>Винерс Сэйлор</i>
$\sigma_t = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot E_m \left(1 + \frac{\theta^2}{a^2} \right)}{E_m \left[\left(\frac{\theta^2}{a^2} + 1 \right) + \mu_m \left(\frac{\theta^2}{a^2} - 1 \right) \right] + E_c (1 - \mu_m) \cdot \left(\frac{\theta^2}{a^2} - 1 \right)} = \frac{0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{0,177^2}{0,051^2} \right)}{1,7 \cdot 10^6 \left[\frac{0,177^2}{0,051^2} + 1 + 0,3 \left(\frac{0,177^2}{0,051^2} - 1 \right) \right] + 0,56 \cdot 10^6 (1 - 0,25) \cdot \left(\frac{0,177^2}{0,051^2} - 1 \right)} =$ $= 43,25 \text{ кг/см}^2 = 4,24 \text{ МН/м}^2,$ $\sigma_r = \frac{-\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot E_m \left(\frac{\theta^2}{a^2} - 1 \right)}{E_m \left[\frac{\theta^2}{a^2} + 1 + \mu_m \left(\frac{\theta^2}{a^2} - 1 \right) \right] + E_c (1 + \mu_m) \cdot \left(\frac{\theta^2}{a^2} - 1 \right)} = \frac{-0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 565 \cdot 0,56 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^6 \cdot 11,0496}{1,7 \cdot 10^6 \left[\frac{0,177^2}{0,051^2} + 1 + 0,3 \left(\frac{0,177^2}{0,051^2} - 1 \right) \right] + 0,56 \cdot 10^6 \left(1 + 0,25 \right) \frac{0,177^2}{0,051^2} - 1} =$ $= -33,4 \text{ кг/см}^2 = -3,27 \text{ МН/м}^2$

$$C = 0,2 \text{ кал/г град.} = 0,838 \text{ Дж/кг град.};$$

$$\rho = 2,33 \text{ г/см}^3 = 2330 \text{ кг/м}^3;$$

$$A = \lambda/C\rho = 0,0054 \text{ см}^2/\text{с} = 5,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\alpha = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ кал/см}^2 \text{ с град.} = 6,3965 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м град.};$$

$$\lambda^2 = \alpha/\lambda \cdot \delta = 5,5 \text{ см}^2 = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

За отриманими результатами були складені таблиці 2.13 і 2.14, що містять деякі значення залежностей $T = f(r)$ і $T = f(t)$. За даними таблиць побудовані графіки, представлені на рис. 2.6 і 2.7.

За вже відомим законом розподілу температури по радіусу вікончастого склоспаю можна визначити величину контактного тиску, осьових, радіальних і окружних напружень в скляній частині виробу.

Таблиця 2.13 - Розподіл температури по радіусу вікончастого склоспаю в різні моменти часу $T = f(r)$

Час t	Радіус r , мм														
	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,0	5,0	
1	22°	23,2°	27°	36°	55°	89°	148°	238°	365°	529°	725°	940°	101,7°	108,7°	
4	307°	329°	359°	394°	429°	457°	471°	456°	420°	346°	243°	129°	92°	61°	
8	307°	299°	288°	273°	255°	233°	207°	179°	149°	116°	87°	61°	56°	42°	
10	177°	172°	164°	155°	143°	131°	116°	101°	85°	68°	53°	39°	31°	28°	
13	103°	100°	97°	91°	85°	79°	71°	68°	65°	46°	37°	32°	29,6°	27°	
16	64°	62°	61°	58°	55°	51°	47°	43°	39°	34°	30°	26,4°	26,3°	26,2°	
19	44°	43°	42°	41°	39°	37°	35°	33°	29°	28,5°	28,0°	25,8°	25,6°	25,1°	
22	33°	33°	32°	31,8°	31°	30°	29°	28°	26,6°	25,4°	24,2°	24,0°	23,8°	23,72°	
25	28°	28,7°	27,5°	27,1°	26,7°	26,2°	25,6°	25°	24,4°	23,8°	23,2°	23,12°	23,01°	22,9°	
28	25,1°	25°	24,9°	24,7°	24,4°	24,2°	23,9°	23,6°	23,3°	23,16°	23,1°	23,02°	22,92°	22,6°	
31	23,6°	23,6°	23,5°	23,4°	23,3°	23,1°	23°	22,8°	22,6°	22,5°	22,3°	22,2°	22,12°	22,04°	
34	22,8°	22,8°	22,8°	22,7°	22,6°	22,6°	22,5°	22,4°	22,3°	22,2°	22,16°	22,1°	22,03°	22,01°	

Аналіз даних, що містяться в таблицях 2.13, 2.14 і рис. 2.6, 2.7, показує, що за перші три секунди температура зовнішньої кромки скла, що з'єднується з металом, досягає 1000°C і відбувається розплав, в той час як в центрі температура не перевищує 200°C.

Таблиця 2.14 - Зміна температури в часі для різних точок по радіусу вікон частого склоспая $T = f(r)$

Час t	Радіус r , мм													
	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40
0,5	22,05°	307°	306°	177°	103°	64°	44°	33,5°	28°	25,1°	23,6°	22,8°	22,44°	22,23°
0,8	23,2°	329°	299°	172°	100°	62,9°	43,4°	33,1°	27,8°	25°	23,6°	22,8°	22,43°	22,22°
0,1	25,4°	348°	292°	167°	98°	61°	42,7°	32,7°	27,6°	24,9°	23,5°	22,79°	22,41°	22,21°
1,5	41°	406°	268°	151°	89,7°	57,3°	40,4°	31,6°	27°	24,6°	23,3°	22,7°	22,37°	22,19°
2,0	89,8°	458°	233°	130°	78,7°	51,6°	37,4°	30°	26,2°	24,2°	23,1°	22,59°	22,3°	22,16°
2,5	204°	467°	189°	106°	65°	45°	33,9°	28,2°	25,2°	23,7°	22,88°	22,46°	22,24°	22,12°
3,0	415°	398°	138°	79°	51°	37°	30,1°	26,2°	24,2°	23,1°	22,6°	22,3°	22,16°	22,08°
3,5	725°	243°	83°	52°	37°	30,2°	26,3°	24,2°	23,1°	22,6°	22,3°	22,16°	22,08°	22,04°
3,8	941°	123°	51°	36°	29,4°	25,8°	24°	23°	22,5°	22,3°	22,15°	22,07°	22,06°	22,03°
4,0	1020°	68°	47°	31°	26,4°	23,7°	22,6°	22,7°	22,4°	22,4°	22,13°	22,06°	22,05°	22,02°
4,5	1087°	57°	43°	30,4°	26,1°	23,2°	22,78°	22,69°	22,38°	22,18°	22,12°	22,05°	22,04°	22,01°
5,0	1092°	52°	41,3°	29,2°	26°	23,06°	22,61°	22,54°	22,31°	22,15°	22,09°	22,04°	22,03°	22,0°

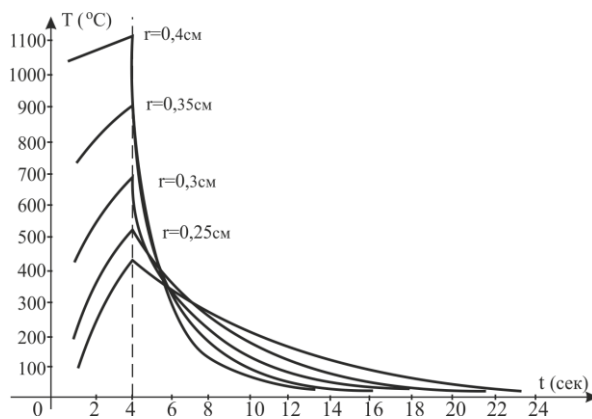


Рис. 2.6 - Зміна температури по радіусу вікончатого склоспая в залежності від часу

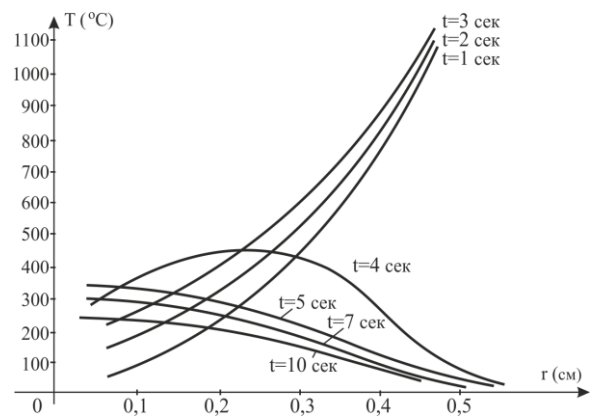


Рис. 2.7 - Зміна температури по радіусу вікончатого склоспая

Після відключення індуктора (на четвертій секунді) видно хвильової процес поширення тепла від краю до центру і назад, що характеризується все

ще досить великим градієнтом температур між центром скла і периферією. Необхідно звернути увагу на ту обставину, що при змінах радіусу на 1,5 мм перепад температури лежить в межах лише від 5°C до 50°C , що на порядок менше, ніж при зміні радіуса на 5 мм. Результати контрольних підрахунків для вікончатого скла ФД дають величини напружень $\sigma = -50,96 \dots +4,9 \cdot \text{МПа}$, що порівнювані зі значеннями руйнівних напружень для скла С52-1. Якщо врахувати при цьому можливі розкид фізико-механічних характеристик матеріалів, що з'єднуються, призводять до збільшення напружень на 20-25%, мікродефекти і концентратори напружень, то стає зрозумілим 86% вихід бракованої продукції.

Звідси можна зробити практичний висновок: для вікончатого скла фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, ФРЗ-11, радіус яких сягає 4-5 мм, доцільно відмовитися від індукційного способу розігріву і віддати перевагу йому іншому, що забезпечує істотно менший перепад температур.

На підставі зазначених розрахунків заводу-виробнику ФД було рекомендовано змінити технологічний процес створення вікончатих склоспаїв таким чином, щоб зменшити градієнт температури по радіусу виробу. З цією метою на початку був використаний багатовитковий обертальний кондуктор, що дозволив дещо вирівняти температурне поле, що зменшило кількість дефектів на стеклах. Надалі операція склоспаювання стала проводитися з використанням графітових касет, які розміщені в муфельній печі, що дало можливість збільшити кількість виробів, що проходять цю технологічну операцію одночасно, і домогтися ще більш рівномірного розподілу температури по радіусу виробу.

Як показують розрахункові дані, напруження в цьому випадку становлять: $\sigma = -4,74 \cdot \text{МПа}$. Економічний ефект від впровадження рекомендації по вирівнюванню температурного поля в процесі операції склоспаювання за рахунок використання муфельній печі і графітових касет склав більше мільйона гривень [11].

Для вузлів іншого класу, наприклад, бусинок склоспаїв, у яких радіус знаходиться в межах 0,8–1,7 мм, причому розігрів йде як з внутрішньої, так і зовнішньої поверхні, індукційний спосіб розігріву є прийнятним.

2.3 Визначення напружень в корпусах фотодатчиків при роботі в розріджених шарах атмосфери

Для порівняння результатів, отриманих за різними розрахунковими методиками, було проведено теоретичне визначення напружень, що виникають в корпусах виробів при експлуатації в розріджених шарах атмосфери. Для цього використовувалася вже відома розрахункова методика, викладена в п. 9.2.5 [11]. Для циліндра, при $R = 0,9$ см, товщині стінки 0,2 мм для перерізів, досить віддалених від його торців, коли надлишковий тиск одно $0,98 \cdot 10^5$ Па, маємо:

$$\sigma_m = \frac{1 \cdot 0,9}{2 \cdot 0,02} = 22,5 \text{ кг / см}^2 = 22,05 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad \sigma_t = 44,1 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

що не є небезпечним для сплаву «ковар», з якого виготовлені корпусу ФД. Тому перевірку міцності, перш за все, необхідно проводити для скляної частини виробу.

В нашому випадку $q = (0,85 \cdot 10^5 \text{ Па})$, $h = 0,4 \text{ мм} = 0,04 \text{ см}$, $k = 2,9 \text{ мм} = 0,29 \text{ см}$, $\mu = 0,25$. Слід враховувати, що в процесі варіння відбувається розплав скла і його товщина зменшується. Проміри ввареного скла показали, що товщина деяких з них дорівнює $h = 0,3 \text{ мм}$, а у країв – навіть 0,2 мм. Очевидно, що не виключені випадки ще меншої товщини ввареного скла. Відповідно до формул (9.126) [11] при $r = R$ маємо:

$$M_r = \frac{0,86 \cdot 0,29^2}{16} (3,25 - 1,25) = 0,0091 \text{ кг} \cdot \text{см} / \text{см} = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ Нм} / \text{м},$$

$$M_t = \frac{0,86 \cdot 0,29^2}{16} (1,75 - 1,25) = 0,0027 \text{ кг} \cdot \text{см} / \text{см} = 2,65 \cdot 10^{-4} \text{ Нм} / \text{м}.$$

Звідси за формулою отримуємо:

$$\sigma_{t_{\max}} = \pm \frac{6M_t}{h^2} = \pm \frac{6 \cdot 0,0027}{16 \cdot 10^{-4}} = \pm 8,6 \text{ кг} / \text{см}^2 = \pm 8,43 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad \sigma_{r_{\max}} = 127,4 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

При товщині скла $h = 0,2$ мм:

$$\sigma_{r_{\max}} = \pm \frac{6M_r}{h^2} = \pm \frac{6 \cdot 0,1091}{16 \cdot 10^{-4}} = \pm 34 \text{ кг} / \text{см}^2 = \pm 33,3 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

В центрі пластини, при $r = 0$ (формула (9.126)),

$$M_r = M_t = \frac{qR^2}{6} (1 + \mu) = 4,41 \cdot 10^{-4} \text{ Нм} / \text{м}, \quad \sigma_t = \sigma_r = \pm \frac{6M}{h^2} = \pm 16,5 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

При товщині скла $h = 0,2$ мм, $\sigma_r^{\max} = 90 \text{ кг} / \text{см}^2 = 88,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Максимальний прогин в центрі пластинки: $\omega_{\max} = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{qR^4}{Eh^3} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

У відповідності з (9.127) при $r = R$: $\sigma_{r_{\max}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{qR^2}{h^2}$. Досліджуємо, як

впливають на величину $\sigma_{r_{\max}}$ параметри, що входять в формулу. При $h = 0,4$ см, $R = 0,29$ см, задаючись різними значеннями q , побудуємо залежність $\sigma_{r_{\max}} = f(q)$ (рис. 9.21).

Оскільки для скла С52-1, використовуваного при виготовленні ФД, межа міцності $\sigma_B = (294-882) \cdot 10^5$ Па, а для скла № 46 $\sigma_B = 882 \cdot 10^5$ Па (табл. 2.2), то з графіка на рис. 2.7, видно, що кращим, з точки зору міцності, використання скла № 46.

Задаючись відповідними значеннями q і h , досліджуємо, як впливає на величину напружень зміна R (рис. 2.9).

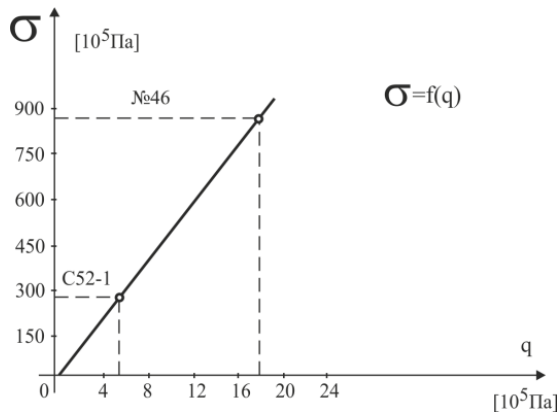


Рис. 2.8 - Радіальні напруження в вікончатій скляній пластині корпусу ФД в залежності від перепаду тиску навколишнього середовища

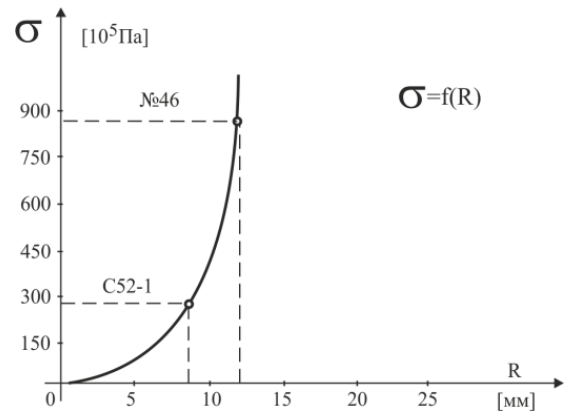


Рис. 2.9 - Залежність радіальних напружень в вікончастому склоспаї від радіуса пластини

Аналіз графіка, зображеного на рис. 2.8, показує, що при заданому перепаді тиску, наприклад, 85-кПа, товщині пластинки $h = 0,04$ пластина, виготовлена зі скла С52-1, може мати максимальний діаметр (1,6+1,65) см, а аналогічний ФД при інших рівних умовах, але зі склом №46, може бути виготовлений з діаметром вікончатого склоспая 2,8-2,85 см.

На рис. 2.10 представлений графік, що відображає вплив зміни товщини пластини h на величину виниклих в ній напружень при перепаді тиску. З графіка видно, що при товщині пластини $h \approx 0,013$ см скло С52-1 знаходиться в небезпечному стані, в той час як пластина, виготовлена зі скла № 46, може бути тоншою ($h = 0,01$ см) і витримувати при інших рівних умовах аналогічні навантаження.

Наведені дослідження свідчать про необхідність використання скла № 46 замість скла марки С52-1, а також про бажаність збільшення товщини скляної пластини.

Слід зауважити, що напруження в вікончатому склоспаї, який являє собою круглу скляну пластину, жорстко з'єднану з корпусом ФД, будуть дещо більшими, ніж отримані вище значення, оскільки необхідно врахувати деформацію самого корпусу ФД. Цю деформацію і виниклі внаслідок цього напруження можна визначити розрахунковим шляхом за вже відомими методиками [45].

Обчислимо β , який визначає розрахункову схему (коротка або довга оболонка) в нашому випадку (2,5 [45]):

$$\beta l \geq 3 \quad \beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{ah}}. \quad (2.5)$$

Для розглянутого випадку: $\mu = 0,3$; $h = 0,02$; $a = 0,3825$ см:

$$\beta l = \frac{1,285 \cdot 0,39}{\sqrt{0,3825 \cdot 0,02}} = 5,76 > 3.$$

Таким чином, отримуємо, що для довгої оболонки розрахункова схема буде мати вигляд (рис. 2.11)

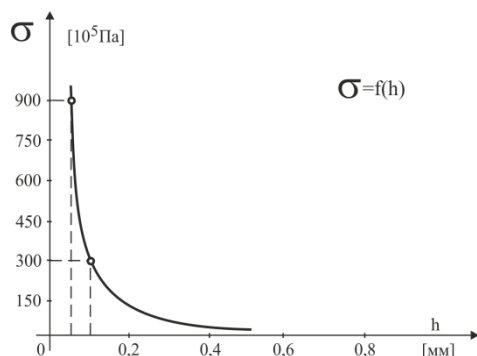


Рис. 2.10 - Залежність напружень в вікончатому склоспаї від зміни товщини скляної пластини і тиску

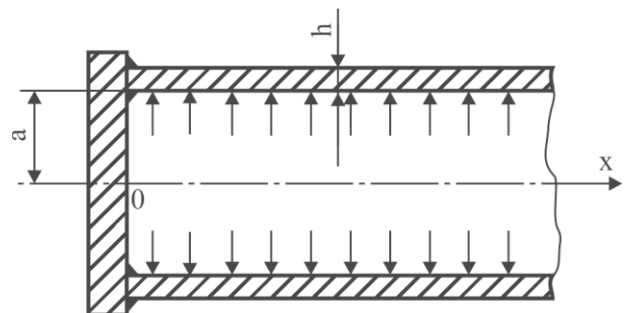


Рис. 2.11 - Розрахункова схема для довгої циліндричної оболонки [45]

Граничні умови для розглянутого випадку: $x = 0, \omega = 0, x = 0, \omega' = 0$.

Отримуємо рівняння: $\omega(x) = \frac{qa^2}{Eh} [1 - e^{-\beta x}]$, $\omega'(x) = 2\beta \frac{qa^2}{Eh} e^{-\beta x} \sin \beta x$, $\omega'(0) = 0$

$$M(x) = \frac{q}{2\beta^2} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x), \quad M_x(0) = \frac{q}{2\beta^2}. \quad (2.6)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо:

$$M_x(0) = \frac{qah}{2 \cdot 1,285^2} = 0,0019 \text{ кг} \cdot \text{см} / \text{см} = 0,018 \text{ нм} / \text{м}.$$

$$\sigma_x = -\frac{12M_x}{h^3} z = -\frac{12M_x \cdot h}{h^3 \cdot 2} = -27,9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Сумарні напруження в круглій скляній пластині вікончатого склоспая:

$$\sigma = \sigma_x + \sigma_{r \max} = -61,25 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

2.4 Статистичне оцінювання міцності скла з урахуванням поверхневих дефектів з використанням енергетичного підходу Гріффітса

Для визначення величини руйнівних напружень з використанням енергетичного критерію Гріффітса була накопичена статистика дефектів скла на 258 виробках і проведене їх оцінювання. З накопиченого статистичного матеріалу випливає, що довжина мікротріщин лежить в межах від $l = 0,0025$ мм до $l = 0,2225$ мм (табл. 2.15).

Таблиця 2.15 - Довжина мікротріщин у вікончастому склі ФД і відповідні їй значення міцності

l (мм)	0,225	0,425	0,625	0,825	1,025	1,225	1,425	1,625	1,825	2,025	2,225	
C (мм)	0,1125	0,2125	0,3125	0,4125	0,5125	0,6125	0,7125	0,8125	0,9125	1,0125	1,1125	
σ_B [10^5 Па]	126,8	92,2	76,2	66,3	59,5	54,5	50,4	47,3	44,6	42,3	40,2	
$[\sigma]_B$	$K = 1,3$	97,5	71,2	58,5	51,1	45,7	41,7	38,7	36,3	34,2	35,5	30,8
	$K = 1,5$	84,5	61,6	50,7	44,3	39,6	36,2	33,6	31,4	29,5	28,2	26,8
	$K = 2,0$	63,2	46,1	38,1	33,2	29,5	27,2	25,1	23,6	22,3	21,5	20,3
	$K = 2,5$	57,5	36,9	30,3	26,5	23,8	21,7	20,2	18,8	17,8	16,9	16,1
	$K = 3,0$	42,2	30,8	25,4	22,0	19,8	18,1	16,7	15,8	14,8	14,1	13,3
	$K = 3,5$	36,2	26,3	24,7	18,9	16,9	15,6	14,4	13,5	12,7	12,0	11,45

Тут же наведені значення σ_B , розраховані за формулою Гріфітса для одноосного напруженого стану, а також значення допустимих напружень $[\sigma]_B$, визначені для різних коефіцієнтів запасу міцності. Для визначення використовувалися наступні значення величин, що входять в розрахункові формули: $E = 0,55 \cdot 10^{11}$ Па, $\gamma = 130 \cdot 1,0197 \cdot 10^{-6}$ кг/см² (12,99 Па), $\mu = 0,25$, $C = 0,1125 \dots 1,125$ мм. За даними таблиці 2.15 побудовані графіки, представлені на рис. 2.12.

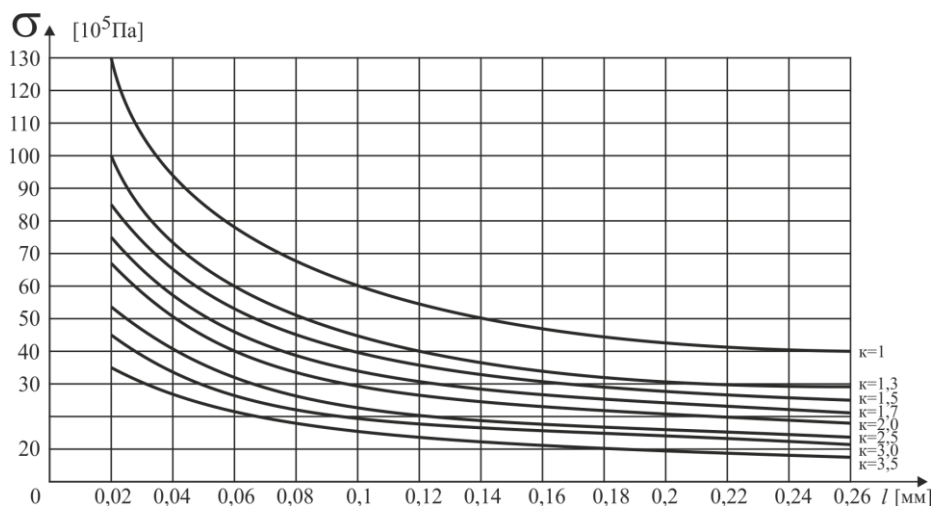


Рис. 2.12 - Залежність граничної міцності і допустимих напружень від довжини мікротріщин

Для визначення величини математичного сподівання, дисперсії і середнього квадратичного відхилення розмірів мікротріщин побудована гістограма частот розглянутих дефектів (рис. 2.13), де по осі абсцис відкладені часткові інтервали, а по осі ординат - щільність частоти. Гістограма побудована на підставі даних таблиці 2.16.

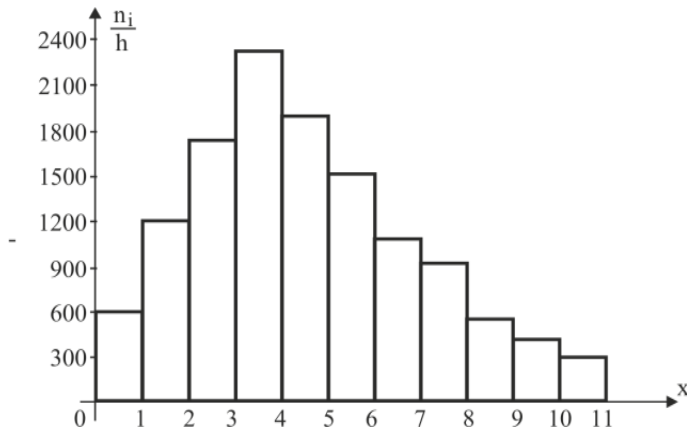


Рис. 2.13 - Гістограма відносної частоти появи розглянутих дефектів

За видом гістограми (рис. 2.13) можна припустити, що наявні статистичні дані підкоряються нормальному закону розподілу. Це припущення нижче перевірено за допомогою критерію згоди Пірсона.

Таблиця 2.16 - Таблиця частот і щільності частоти мікродефектів скла ФД

Частковий інтервал довжиною $h = 0,02$	Сума частот варіант часткового інтервалу n_i	Щільність частоти n_i/h	
1	0,0025...0,0225	12	600
2	0,0225...0,0425	24	1200
3	0,0425...0,0625	35	1750
4	0,0625...0,0825	46	2300
5	0,0825...0,1025	38	1900
6	0,1025...0,1225	31	1550
7	0,1225...0,1425	21	1050
8	0,1425...0,1625	19	950
9	0,1625...0,1825	12	600
10	0,1825...0,2025	11	550
11	0,2025...0,2225	9	450

Математичне сподівання можна визначити як вибіркове середнє \bar{x}_B . При цьому можна показати, що \bar{x}_B – незміщена оцінка, тобто математичне очікування. При визначенні розподілу вибіркової середньої і дисперсії використовувався метод добутків [46]. Для зручності обчислень всі дані зведені в табл. 2.17.

Таблиця 2.17 - Визначення вибіркового середнього

Вибіркові (початкові варіанти) x_i	Частоти варіант n_i	Умовні варіанти $u_i = \frac{x_i - c}{h}$	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$	$n_i(u_i + 1)^2$	
1	0,0125	12	-3	-36	108	48
2	0,0325	24	-2	-48	96	24
3	0,0525	35	-1	-35	35	0
4	0,0725	46	0	0	0	46
5	0,0925	38	1	38	38	152
6	0,1125	31	2	62	124	279
7	0,1325	21	3	63	189	336
8	0,1525	19	4	76	304	475
9	0,1725	12	5	60	300	432
10	0,1925	11	6	66	396	539
11	0,2125	9	7	63	441	576
$\Sigma x_i = 1,2375$	$\Sigma n_i = 258$	$\Sigma u_i = 22$	$\Sigma n_i \cdot u_i = 309$	$\Sigma n_i \cdot u_i^2 = 2031$	2907	

де $u_i = \frac{x_i - c}{h}$; $c = 0,0725$ – хибний нуль; $h = 0,02$.

Контроль обчислень табл. 2.18:

$$\Sigma n_i(u_i + 1)^2 = \Sigma n_i u_i^2 + 2 \Sigma n_i u_i + n = 2031 + 2 \cdot 309 + 258 = 2907.$$

$$\text{Умовні моменти: } M_1^* = \frac{\Sigma n_i \cdot u_i}{n} = \frac{309}{258} = 1,197674, \quad M_2^* = \frac{\Sigma n_i \cdot u_i^2}{n} = \frac{2031}{258} = 7,872093.$$

Визначимо вибірккову середню: $\bar{X}_B = M_1^* \cdot h + c = 1,197674 \cdot 0,02 + 0,0725 = 0,09645$.

Дисперсію: $D_B = [M_2^* - (M_1^*)^2] \cdot h^2 = (7,872093 - 1,197674^2) \cdot 0,02^2 = 0,002575$. Середнє

квадратичне відхилення: (СКВ): $\sigma = 0,050744$.

Здійснимо оцінювання достовірності отриманих результатів, тобто перевіримо, використовуючи критерій згоди Пірсона, гіпотезу про

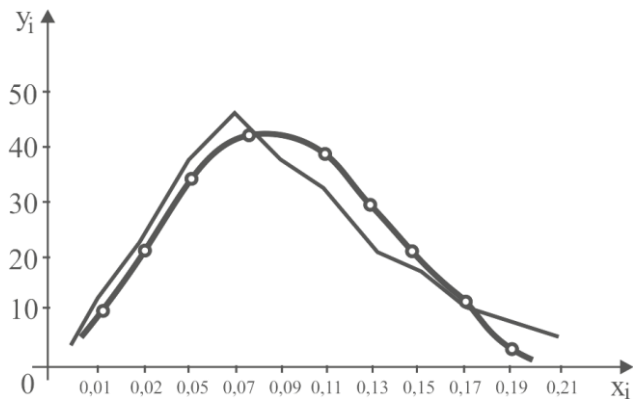


Рис. 2.14 – Крива розподілу і полігон

нормальний розподіл генеральної сукупності. Для цього побудуємо нормальну криву за експериментальними даними. Для зручності обчислень складена була таблиця 2.18, за даними якої побудована крива розподілу і полігон (рис. 2.14).

Таблиця 2.18 - Дані для побудови кривої розподілу і полігона

X_i	n_i	$X_i - \bar{X}_B$	$U_i = \frac{X_i - \bar{X}_B}{\sigma_B}$	$\varphi(U_i)$	$y_i = \frac{n_i h}{\sigma_B} \cdot \varphi(U_i) = 101,6869 \cdot \varphi(U_i)$	
1	0,0125	12	-0,08395	-1,654382	0,1023	1110,40256
2	0,0325	24	-0,06395	-1,260247	0,1804	1918,34431
3	0,0525	35	-0,04395	-0,866112	0,2732	2927,781
4	0,0725	46	-0,02395	-0,471977	0,3572	3136,3226
5	0,0925	38	-0,00395	-0,077843	0,3977	4240,44088
6	0,1125	31	0,01605	0,316293	0,3790	3938,5393
7	0,1325	21	0,3605	0,710428	0,3101	3231,5331
8	0,1525	19	0,05605	1,104564	0,2179	2322,15757
9	0,1725	12	0,07605	1,498699	0,1315	1413,37182
10	0,1925	11	0,09605	1,892834	0,0669	76,802853
11	0,2125	9	0,11605	2,286969	0,0290	42,94892
$\Sigma X_i = \Sigma n_i = 258$						$\Sigma y_i = 258$
1,2375						

$$\text{де } \varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \text{ [46].}$$

Порівняємо емпіричні і теоретичні частоти, тобто, користуючись критерієм згоди Пірсона χ^2 , перевіримо нульову гіпотезу: генеральна сукупність розподілена за нормальним законом. Для цього, використовуючи дані таблиць 2.17 і 2.18, проведемо обчислення, результати яких для зручності розгляду зведені до таблиці 2.19.

Таблиця 2.19 - Обчислення критерію $\chi_{\text{набл.}}^2$.

i	Емпіричні частоти n_i	Теоретичні частоти n_i^1	$n_i \cdot n_i^1$	$(n_i \cdot n_i^1)^2$	$\frac{(n_i \cdot n_i^1)^2}{n_i^1}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i^1}$
1	12	11	1	1	0,09091	144	13,0909
2	24	19	5	25	1,31579	576	30,316
3	35	29	6	36	1,2414	1225	4224
4	46	38	8	64	1,684	2116	55,68
5	38	42	-4	16	0,38095	1444	34,38
6	31	39	-8	64	1,6410	961	24,61
7	21	32	-11	121	3,7812	441	13,781
8	19	23	-4	16	0,69565	361	15,69
9	12	14	-2	4	0,2857	144	10,286
10	11	7	4	16	2,2857	121	17,286
11	9	4	5	25	6,25	81	20,25
	258	258			$\chi_{\text{набл.}}^2 = 19,65$		277,61

$$\text{Контроль обчислення таблиці 2.19: } \left[\sum \frac{n_i^2}{n_i^1} \right] - n = 277,61 - 258 = 19,65.$$

Обчислення числа ступенів свободи: $k = S - 1 - r = S - 3$, де r – число параметрів, необхідних для оцінки закону. У разі нормального розподілу $r = 2$; S – число груп (часткових інтервалів). Звідси $k = 11 - 3 = 8$. У таблиці критичних точок розподілу χ^2 [46] за рівнем значущості $\alpha = 0,01$ і числу степенів вільності $k =$

5 знаходимо χ^2 : $\chi_{кр}^2(0,05/8) = 20,1$. Оскільки $\chi_{кр}^2 > \chi_{набл.}^2$, немає підстав відкидати нульову гіпотезу, тобто дані спостережень узгоджуються з гіпотезою про нормальний розподіл генеральної сукупності, оскільки розбіжність емпіричних і теоретичних частот - незначна. У практичних розрахунках дуже суттєве значення має визначення допустимих (толерантних) меж U_1 і U_2 [40], в яких з ймовірністю γ міститься доля P всієї сукупності, тобто меж, в яких із заданою вірогідністю будуть перебувати певні за величиною (в даному випадку по довжині) розміри мікротріщин.

При нормальному розподілі вибірки x_i визначимо за даними вибірових характеристик \bar{X}_B і σ такі межі: $U_1 = \bar{X}_B - k\sigma$, $U_2 = \bar{X}_B + k\sigma$, де з імовірністю γ ми можемо гарантувати потрапляння в них частки сукупності, не меншою заданої межі P . В формулах \bar{X}_A – вибірове середнє, σ – СКВ. Значення k

наближено виражається формулою: $k = k_\infty \left(1 + \frac{x\gamma}{\sqrt{2\pi}} + \frac{5x^2\gamma + 10}{12n} \right)$, де k_∞ – визначається співвідношенням $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-k_\infty}^{+k_\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\Phi_0(k_\infty) = P$.

Із рівняння: $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_\gamma}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0,5 - \Phi_0(x_\gamma) = 1 - \gamma$ визначається x_γ .

Прорахуємо три різні варіанти:

1. Задаючись $\gamma = 0,99$ і $P = 90\% = 0,9$, визначаємо за таблицями [47]: $k_\infty = 1,645$: $2\Phi_0(k_\infty) = 0,9$. Отримаємо, що:

$$k = 1,645 \left(1 + \frac{2,33}{\sqrt{2 \cdot 258}} + \frac{5 \cdot 2,33^2 + 10}{12 \cdot 258} \right) = 1,645(1,102572 + 0,011997) = 1,833466.$$

$$U_2 = \bar{X}_B + k\sigma = 0,09645 + 1,833466 \cdot 0,050744 = 0,189487$$

$$U_1 = \bar{X}_B - k\sigma = 0,09645 - 1,833466 \cdot 0,050744 = 0,003412.$$

2. Задаючись $\gamma = 0,99$ и $P = 95 \% = 0,95$, отримаємо: $k_{\infty} = 1,96$:
 $2\Phi_0(k_{\infty}) = 0,95$,

$$k = 1,96 \left(1 + \frac{2,33}{\sqrt{2 \cdot 258}} + \frac{5 \cdot 2,33^2 + 10}{12 \cdot 258} \right) = 2,18,$$

$$U_2 = \bar{X}_B + k\sigma = 0,09645 + 2,18 \cdot 0,050744 = 0,207303,$$

$$U_1 = \bar{X}_B - k\sigma = 0,09645 - 2,18 \cdot 0,050744 = 0,014171.$$

3. Задаючись $\gamma = 0,99$ и $P = 0,8$, отримуємо: $k_{\infty} = 1,28$: $2\Phi_0(k_{\infty}) = 0,8$,

$$k = 1,28 \left(1 + \frac{2,33}{\sqrt{2 \cdot 258}} + \frac{5 \cdot 2,33^2 + 10}{12 \cdot 258} \right) = 1,426648,$$

$$U_2 = \bar{X}_B + k\sigma = 0,09645 + 1,426648 \cdot 0,050744 = 0,168843$$

$$U_1 = \bar{X}_B - k\sigma = 0,09645 - 1,426648 \cdot 0,050744 = 0,024056.$$

Отриманим толерантним інтервалам відповідають такі величини напружень руйнування, одержуваних за формулою Гріфітса:

1) $\sigma_g = (43,78 \dots 326,2) \cdot 10^5$ Па; 2) $\sigma_g = (41,86 \dots 160,11) \cdot 10^5$ Па; 3) $\sigma_g = (46,38 \dots 122,88) \cdot 10^5$ Па.

Таким чином, задаючись певною ймовірністю γ , можна обчислити значення небезпечних руйнівних напружень, що відповідають мінімальній і максимальній довжині мікротріщин, що обмежують із заданим ступенем ймовірності інтервал допустимих значень. Отже, наявність статистичних даних про розміри мікродефектів дозволяє з заданою ймовірністю визначити величину небезпечних напружень, які можуть призвести до руйнування.

2.5 Методика проектного розрахунку на міцність металоскляних фотодатчиків РЕА, що герметизується компаундами

Таким чином, для практичного використання конструкторами і технологами пропонується наступна методика проектного розрахунку вузлів ФД, що містять склоспаї:

1. Розрахунок розподілу температури.
2. Розрахунок температурних напружень для отриманого закону або по одному зі спрощених законів.
3. Розрахунок контактних тисків і сумарних напружень з урахуванням одночасного впливу тиску і температури.
4. Визначення напружень, які виникають від експлуатаційних навантажень.
5. Пошук сумарних напружень в небезпечній точці.
6. Визначення граничних напружень з урахуванням стану поверхні скла.
7. Отримання умови міцності.

Перерахована послідовність розрахункових операцій може бути використана при складанні робочих програм і алгоритмів при створенні автоматичних систем проектування виробів РЕА.

Висновки до другого розділу

1 Науково доведено, що при виготовленні бусинкових склоспаїв для зменшення внутрішніх напружень замість скла С48–2 ефективніше використовувати скло марки С52-1.

2 Встановлено, що розкид значень ФМХ матеріалів при створенні РЕА може призводити до збільшення напружень на 20–25 %. Рекомендовано для забезпечення умов міцності металоскляних виробів РЕА вводити вхідний контроль ФМХ матеріалів, що використовуються, обмежуючи заданою наперед областю розкид цих характеристик.

3 Науково обґрунтовано, що індукційний спосіб склоспаю, створює стрибкоподібний тепловий режим, припустимий лише для виробів, які мають невеликий (0,5...1,5 мм) перепад радіуса між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла. Для виробів, у яких цей перепад радіусів дорівнює 4–6 мм і

більше, індукційний спосіб склоспая є неприпустимим, бо викликає значний градієнт температури і температурні напруження.

4 Показано, що розрахункова методика визначення температурних напружень, викладена в п. 9.2.3 [11], може бути застосована лише в тих випадках, коли можна знехтувати деформацією, що охоплює частини вузла ФД.

5 Показано, що експлуатаційні умови, за яких виникають перепади тиску навколишнього середовища, призводять до виникнення додаткових напружень у вузлах і деталях ФД РЕА. Розроблено методику призначення допустимого розкиду геометричних розмірів виробів і ФМХ матеріалів, що використовуються при створенні ФД РЕА.

6 Розроблено методику визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках. Запропоновано методику визначення температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу.

7 Розроблено методику визначення сумарних напружень в вузлах ФД з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів, що впливають на міцність виробів.

8 Розвинуто енергетичний підхід Гріффітса, на базі якого запропоновано спосіб розрахунку небезпечних руйнівних напружень, що відповідають мінімальній і максимальній довжині мікротріщин, що обмежують із заданим ступенем ймовірності інтервал допустимих значень.

9 Розроблено методику проектного розрахунку на міцність фотодатчиків РЕА, що містять склоспаї і герметизується компаундами, яка враховує конструкторські, технологічні і експлуатаційні фактори, що призводять до виникнення напружень у виробках, розкид геометричних розмірів і ФМХ матеріалів, концентратори напружень.

3 МЕТОДИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ РЕА

3.1 Апаратура та методика проведення експериментів

Для вимірювання внутрішніх залишкових напружень в корпусах і склі ФД, для перевірки ефективності різних операцій технологічного процесу, для контролю теоретичних розрахунків використовувалася наступна апаратура і обладнання, частина з якої є стандартною, а частина - спеціально доопрацьованою або виготовленою для необхідних вимірювань. У роботі використані: міст постійного струму МО-62, дзеркальний вольтметр типу М197/1, магазин опорів МСР-63, випрямляч ВСА-5, термостат СС-200, установка для різання корпусів ФД, знімні абразивні диски, полярископ-поляриметр ПКС-250, тензорезистори П5-4Т, тензорезистори МПБ-1, плавикова кислота, міст АС-1, клей БФ-2.

Міст постійного струму МО-62, полярископ-поляриметр ПКС-250, дзеркальний вольтметр М197/1 і магазин опорів МСР-62 є стандартними приладами, що випускаються промисловістю. Перераховані прилади відповідно до свого призначення використовувалися для вимірювань згідно прикладеним до них інструкціям за винятком моста постійного струму МО-62, в вимірювальну схему якого були внесені зміни, викликані необхідністю вирішення проблеми тепловідведення і зменшення струму живлення малобазних тензорезисторів, оскільки для тензорезисторів МПБ-1 з базою 1 мм допустима величина струму живлення не перевищує 0,3 мА. Використання таких малобазних тензорезисторів зі звичайною стандартною установкою призведе до перегорання чутливої градки тензорезистора, що унеможливить вимірювання даним приладом. З цією метою в схему МО-62 були внесені вимірювання.

Для різання корпусів ФД була спеціально створена установка. Вона складається з плити (рис. 3.1), на якій змонтований електродвигун постійного струму ДРВ-300 з регульованим числом обертів. Діапазон регулювання: від 0 до 7500 об/хв.

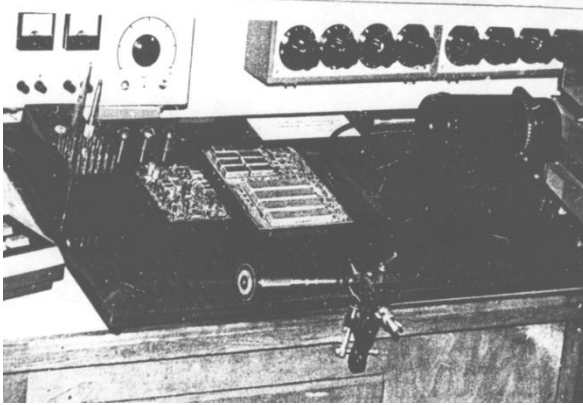


Рис. 3.1 - Установка для різки корпусів ФД

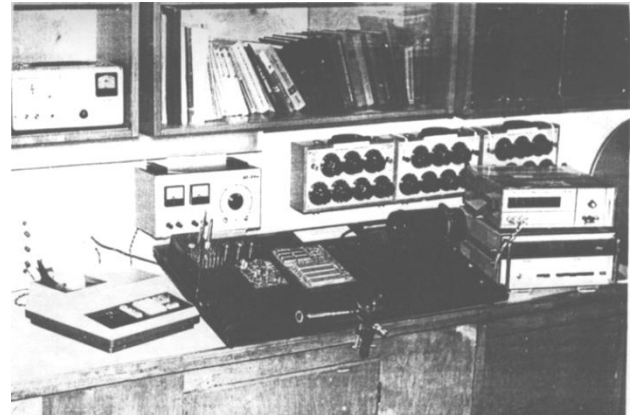


Рис. 3.2 – Апаратура для визначення залишкових напружень у ФД

Двигун через ремінну передачу приводить в обертання гнучкий стоматологічний валик, який закінчується спеціальним тримачем, в якому кріпилися тонкі (товщиною 0,2-0,3 мм) абразивні або алмазні диски, якими і проводилася розрізання кришок корпусів ФД. Обороти електродвигуна, а отже, і ріжучого інструменту регулювалися випрямлячем ВСА-5.

Корпус ФД злегка затискався по торцях в лещата, встановлені на опорній плиті, а різка велася при 6000-7000 об/хв і дуже малій подачі, щоб не викликати нагрівання деталі, що розрізається. На деталі, що піддаються розрізання на згаданій установці, попередньо наклеювали тензорезистори, що підключаються до вимірювальної апаратури (рис. 3.2).

Наклеювання тензорезисторів здійснювалася клеєм БФ-2 за технологією, спеціально доопрацьованою з урахуванням специфіки досліджуваних виробів:

1. Згідно зі схемою наклеювання датчиків на поверхні деталей розмічались зони наклеювання тензорезисторів, для нанесення рисок використовувався тонко заточений жорсткий олівець.

2. Поверхня мікроприладу в зоні наклейки ретельно очищалася і знежирювалась зубною щіткою, змоченою в одному з розчинників (ГОСТ 2603-79), бензині, спирті-ректифікаті (ДСТУ 4221: 2003).

3. Знежирену поверхню зачищають так, щоб на поверхні залишилися сліди зачистки у взаємних перехресних напрямках. Глибокі подряпини і задирки є неприпустимими, оскільки можуть викликати при наклеюванні тензорезисторів замикання на корпус.

4. Було зроблене остаточне очищення поверхні, для чого місця розміщення тензорезисторів промивалися зубною щіткою, змоченою в спирті-ректифікаті. Промита поверхня висушувалася за нормальною температури і вологості протягом 10-15 хв.

5. На захищеній поверхні виробу в зоні установки тензорезисторів виробу проводилася розмітка осей наклеювання тензорезисторів.

6. На приготовану для наклеювання поверхню деталі наносився м'якою кистю (колонковою або білячою) тонкий шар клею БФ-2, після чого проводилася сушка при кімнатній температурі протягом 10 хвилин.

7. Немарковану сторону тензорезистора протирали спиртом-ректифікатом і просушували протягом 10 хвилин.

8. На немарковану сторону тензорезистора наносився шар клею і просушувався протягом 5 хвилин.

9. Тензорезистори накладались на поверхню деталі так, щоб їх осі збіглися з осями, розміченими на деталі, після чого злегка притискалися до виробу.

10. Тензорезистор покривався сигаретним папером, і надлишки клею видавлювалися. Паперова прокладка знімалася, і тензорезистор притискався чистим пальцем на 1-2 хв. Протягом 10-15 хв здійснювалося просушування.

11. Тензорезистор притискався до поверхні виробу через фтороплівку або целофан затискачем або струбциною тиском (0,98...1,96)·кПа.

Для деталей складних конфігурацій допускається після наклеювання тензорезисторів: обгорнути деталь по п. 5, накласти жорсткі прокладки і обгорнути дротом.

Термообробка наклеєних тензорезисторів:

1. Наклеєні тензорезистори просушують за нормальної температури і вологості протягом 24 годин.

2. Здійснюється термообробка в сушильній шафі, печі або шляхом місцевого обігріву. Нагрівання здійснювалось зі швидкістю 1-2°C за хвилину: до 100°C, після чого давалася витримка в 1 годину; до 140°C, після чого робилася витримка 2 години; до 160°C, після чого робилася витримка 1 годину.

3. Охолодження препаративних виробів відбувалося разом з сушильною шафою до нормальної температури.

Контроль тензорезисторів.

1. Деталі розгорталися до обгортки.

2. Перевіряли опір ізоляції тензорезистора по відношенню до металізації виробу приладом типу МОМ-1 або аналогічним. Опір ізоляції має бути не нижче 50 МОм.

3. Перевірявся опір тензорезистора мостом постійного струму класу 0,1.

4. При відмінності виміряного опору від зазначеного на тензорезисторами більш, ніж на 10 МОм, тензорезистор переклеювати, його замінювали новим.

Захист тензорезисторов від агресивного середовища.

1. На тензорезистори і їх виводи наносилось захисне покриття від агресивного середовища - 2-3 шари. Захисне покриття складається з

епоксидної смоли ЕД-5 - 100 вагових частин; поліетілполіоміна - 8; дібутілфталлата - 10.

2. Захисний шар з епоксидного клею просушується протягом 24 годин при температурі 20-23° С і нормальній вологості.

Необхідно пам'ятати, що клей на основі смоли ЕД-5 є дуже токсичним, і працювати з ним необхідно під витяжною вентиляцією в гумових рукавичках. Термін придатності готового клею становить 1 годину після змішування компонентів.

Для відділення скла від корпусу ФД, тобто для здійснення методу деструкції використовувалася плавикова кислота. Для вимірювання залишкових напружень в корпусах ФД використовувалися дровові тензорезистори: двохпетельні з базою 10 мм, чотирьохпетельні з базою 5 мм, а також малобазні безпетельні з базою 1 і 2 мм.

Схема тензометричного приладу показана на рис. 3.3. Тут R_1 – тензорезистор, що є одним плечем мостової схеми, живлення якої здійснюється джерелом струму, включеним в діагональ моста. Опір R_2, R_3, R_4 – магазини опорів, що знаходяться в приладах або в окремих корпусах.

Напруга, що виникає в вимірювальній діагоналі мостової схеми, внаслідок деформації тензорезистора, регулювалася вольтметром, за допомогою якого здійснюється відлік або реєстрація величин сигналів, пропорційних деформацій тензорезистора [48].

Для вимірювання деформацій кришок корпусів ФД, тензорезистори наклеювалися на кришки досліджуваних виробів по колу, як показано на рис. 3.4. При цьому чутливий елемент тензорезистора розташовувався по колу строго паралельно кромці корпусу.

На склі вікончастих спаїв тензорезистори розташовувалися уздовж радіуса, вимірюючи радіальні деформації, які в нашому випадку повинні бути постійними, незалежними від поточного радіуса і приблизно рівними окружним деформаціям.

Для визначення залишкових напружень опір тензорезистора вимірювалося двічі: до вибивання вікончастого спаю, коли система «скло-корпус» представляла собою єдине ціле, і після вибивання скла, коли система «скло-корпус» звільнялася від взаємних зв'язків, що породжують внутрішнє напруження у всій конструкції. Для оцінювання величини внутрішніх напружень в корпусі ФД опір наклеєного на нього тензорезистора також вимірювалося двічі: після наклейки тензорезистора на корпус, а потім - після розрізання корпусу вздовж його поздовжньої осі.

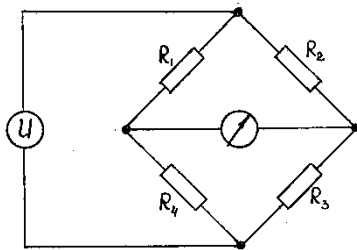


Рис. 3.3 - Схема тензометричного приладу

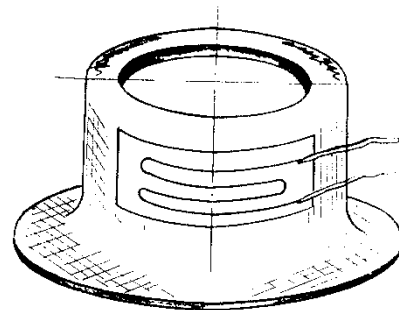


Рис. 3.4 - Схема наклеювання тензорезистора на корпус ФД

Величина відносної деформації визначалася з виразу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{RS}, \quad (3.1)$$

де ε – відносна деформація деталі в місці розташування на ній тензорезистора; ΔR – відносна зміна опору тензорезистора; S – тензочутливість тензорезистора.

Припускаючи, що виміряні деформації не перевищують границі пропорційності досліджуваних матеріалів, можна за законом Гука знайти залишкові напруження:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (3.2)$$

де σ – напруження; E – модуль пружності 1-го роду для розглянутого матеріалу; ε – відносна деформація.

Для визначення величини і знака напружень в скляній частині вікончастого спаю було проведено безпосереднє тензометрування скла, незважаючи на труднощі реалізації цього рішення, пов'язані зі складністю кріплення тензорезисторів на склі та необхідністю від'єднання центральної частини скла від кришки ФД без пошкоджень тензорезистора і скла.

Тензорезистор МПБ-1 наклеювався на злегка затерту поверхню скла за схемою, представленої на рис. 3.4, в напрямку радіуса для вимірювання радіальних напружень. Після закінчення технологічного процесу наклеювання тензорезисторів на скло, останні заклеювалися шаром парафіну, в якому після охолодження робиться вузька (шириною 0,3 мм) канавка, що утворює коло діаметром, майже рівним внутрішньому діаметру торця кришки корпусу.

У цю канавку наливалася плавикова кислота, яка і витравлювала скло по колу канавки. Вимірювання опору тензорезисторів проводилися двічі: до нанесення парафіну на скло, а потім - після випадання витравленої частини

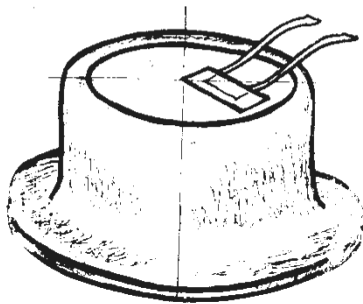


Рис. 3.4 - Препарування скла кришки ФД малобазним тензорезистором

скла з кришки. Зміна опору тензорезистора і характеризувало величину внутрішніх деформацій, а отже, і напружень, які існували в склі, спаяному з металевим корпусом. Вимірювання напружень у склі проводилися описаним чином після операції склоспаювання до відпалу, а потім - після відпалу, що дозволило виявити ефективність прийнятого режиму відпалу.

Аналогічним чином були виміряні напруження в скляній частині вже готових виробів, а також виробів, взятих з заводського складу після тривалого періоду зберігання.

3.2 Методика тензометрування фотодатчиків при висотних випробуваннях

Для визначення внутрішніх напружень, що виникають в корпусах ФД при роботі в розріджених шарах атмосфери використовувалися: магазин опорів МСР-63, термостат СС-200, міст постійного струму МО-62, дзеркальний гальванометр типу М197/1, випрямляч ВСА-5, підсилювач 8АНЧ-7М, осцилограф Н-115, установка для створення перепадів тиску, установка для різання корпусів ФД, знімні абразивні диски, установка для тарування тензорезисторів, тензорезистори МПБ-2, тензорезистори МПБ-1, плавикова кислота, міст АС-1, клей ВФ-2, світлочутливий папір.

Характеристика апаратури, що використовувалася при вимірюваннях внутрішніх напружень в корпусах і склі ФД, наведена вище.

При вимірюваннях напружень під час висотних випробувань використовувалася спеціально розроблена і створена установка. Вона складається (рис. 3.5) з монтажного столу, на якому закріплений прозорий ковпак з вогнетривкого скла, з-під якого відкачувалось повітря за допомогою насоса ВН-1, з'єднаний шлангом з простором під ковпаком. Величина розрідження або тиску всередині камери реєструвалася зразковим манометром, герметизація ущільнень проводилася вакуумної мастилом. Виміряні деформації в процесі експерименту записувалися на світлочутливий папір підсилювача 8АНЧ-7М і осцилографа Н-115 (рис. 3.6).

Для вимірювання тиску, що виникають в корпусах і склі ФД при висотних випробуваннях, використовувалися дровові тензорезистори:

двохпетельні з базою 10 мм, малобазні безпетельні з базою 1 мм, 2 мм, дротяні чотирьпетельні з базою 5 мм.

Для вимірювання деформацій кришок корпусів ФД тензорезистори наклеювалися на кришки по колу або в характерних точках в разі дослідження плоских мікромодулів (ПММ) (рис. 3.7), де показані лише тензорезистори, наклеєні по серединах граней і ребер корпусів.

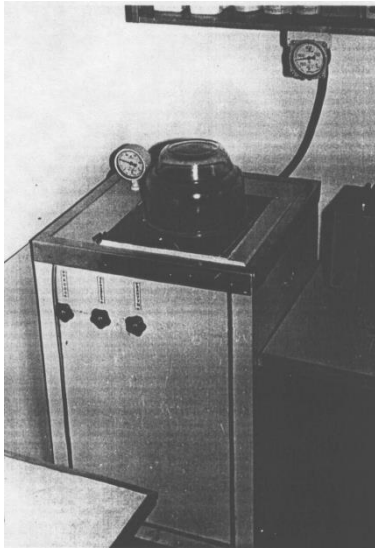


Рис. 3.5 - Установка для створення зниженого тиску при випробуваннях на висотність

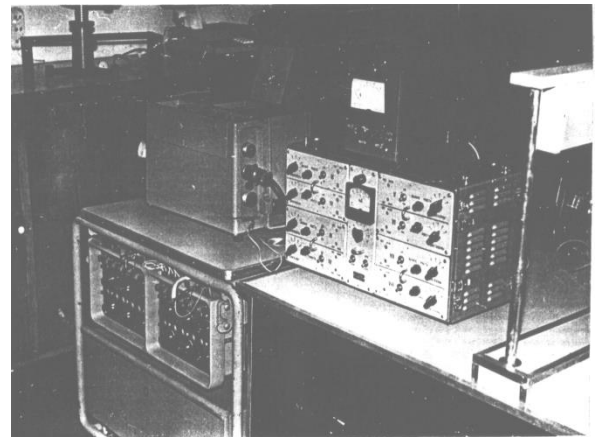


Рис. 3.6 - Підсилювач 8АНЧ-7М і осцилограф Н-115

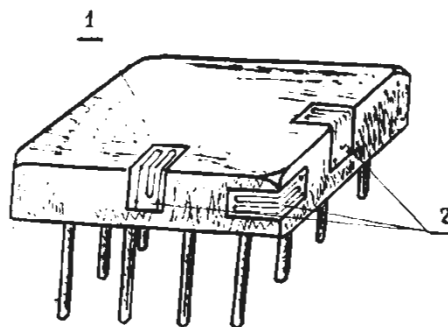


Рис. 3.7 - Схема препарування плати ММ:

1 – корпус,

2 – тензорезистори

Для експерименту були обрані три однакові за кількістю і типом партії плоских мікромодулів: монолітних, напівпустотілих і порожнистих конструкцій з корпусами у формі прямокутного паралелепіпеда, виготовленого із сплаву Д-1 товщиною 0,2 мм - для монолітної і 0,3 мм - для пустотілої і напівпустотілих, герметизованих компаундом ЕЗК-24.

Для вимірювання тиску в корпусах і склі ФД реєструвальна апаратура вмикалась до початку відкачування повітря з-під скляного ковпака. Тим самим на стрічці осцилографа виходили «нульові» деформації, тобто лінії відліку. Потім вмикали насос і здійснювали відкачування повітря з камери, в якій знаходилися випробовувальні вироби з наклеєними на них тензорезисторами. На стрічці осцилографа реєструвалися деформації корпусів ФД і плати ММ, які розпирались внутрішнім тиском і збільшували свої окружні та лінійні розміри. Вимірювання проводилися за допомогою тензорезисторів, попередньо протарованих на стандартній установці для тарування тензорезисторів.

Висновки до третього розділу

1. Проведено комплекс заходів щодо підбору апаратури для проведення випробувань металоскляних ФД:
 - тензометричної апаратури для реєстрації напружень і деформацій у ФД;
 - з метою визначення механічних напружень для розрізання корпусів ФД була створена спеціальна установка;
2. Розроблено комплексну методику тензометрування металоскляних ФД:
 - наклеювання тензорезисторів, спеціально доопрацьовану з урахуванням специфіки досліджуваних виробів:
 - термообробки наклеєних тензорезисторів перед випробуваннями;
 - контролю тензорезисторів та їх захисту від агресивного середовища;
 - методику багатократного вимірювання опору тензорезисторів для підвищення точності отриманих результатів.
2. Розроблено методику тензометрування ФД при висотних випробуваннях з використанням спеціальної вакуумної установки.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ

4.1 Вимірювання зусиль у виводах мікросхем і напружень в склоспаї

Як відомо, електричне та механічне з'єднання мікросхем з платами функціональних вузлів здійснюється за допомогою виводів, що піддаються перед монтажем операціями формування та обрізки, при яких у виводах виникає осьове навантаження, яке при неретельному виконанні зещемлення консолі виводу може передатися у контактний вузол і зруйнувати його повністю або частково, що пізніше в ході експлуатації мікросхеми викличе її відмову з важкими наслідками. І такі випадки мали місце на космічних об'єктах і літаках [49].

При експлуатації мікросхем № 301.12-1 і № 401-14-2, а також на різних етапах технологічного процесу їх монтажу, зберігання, випробування має місце розгерметизація, що відбувається в місцях з'єднання скла з виводами.

Постачальником було висловлено припущення, що причиною дефекту є надмірні осьові навантаження на вивід, що виникають при формуванні або під час експлуатації. Для перевірки цього припущення було проведено вимірювання навантаження на виводи при їх формуванні, а також проведено випробування на розтягнення до руйнування виводів при витягуванні їх зі склоспаю, виміряні радіальні напруження в скляній частині спаю від взаємодії скла з виводами і на підставі отриманих результатів викладені міркування про можливу причину дефекту.

Таким чином, мета роботи, результати якої представлено у цьому розділі, полягала в тому, щоб виміряти величину зусиль, необхідних для виривання виводів мікросхем № 301.12-1 і № 401-14-2 з закладення; руйнівальні зусилля під час випробування виводу на розтяг; радіальні напруження і деформації в скляній частині спаю від взаємодії скла з виводом; розтягувальні зусилля при формуванні виводів мікросхем, виміряти напруження в склоспаї при формуванні виводів мікросхем.

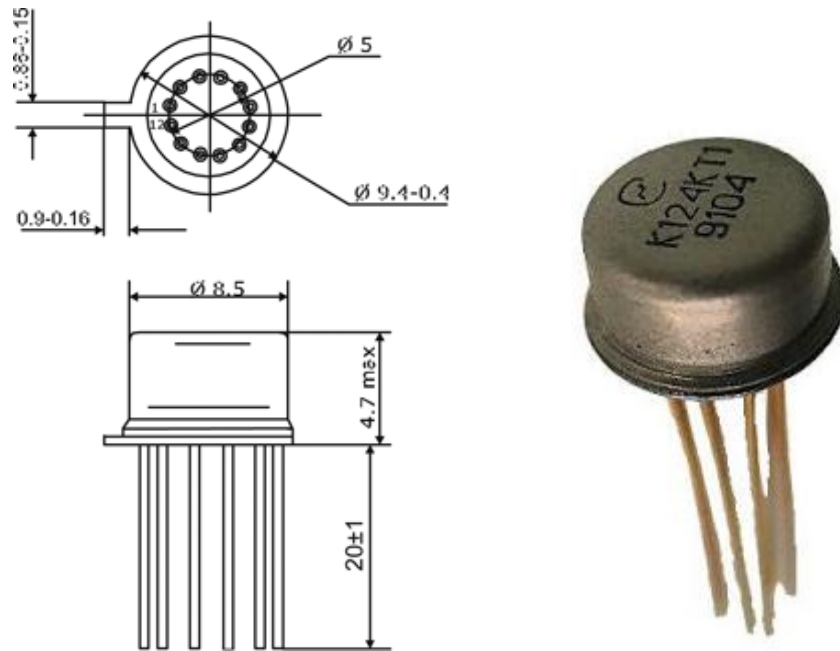


Рис. 4.1 - Корпус 301.12-1

Внаслідок малих розмірів мікросхем і самих виводів для вимірювання тиску були використані тензорезистори МПБ-1 довжиною 1 мм.

4.1.1 Осьові зусилля, що руйнують контактну групу мікросхеми 401–14–2. Для проведення випробувань була спроектована і виготовлена установка, загальний вигляд якої показано на рис. 4.2.

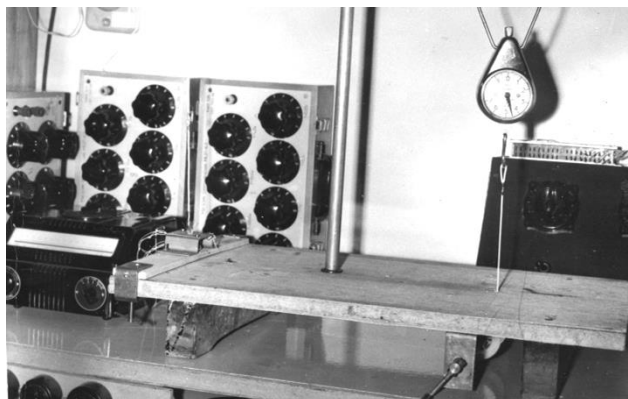


Рис. 4.2 - Пристосування для випробування виводів і схема випробувань

Оскільки до тягових дротів припаювали два дротяних виводи, то виривався (або руйнувався) один, що має меншу міцність. Результати випробувань наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Осьові зусилля руйнування контактної групи мікросхеми № 401–14–2

Вивід	$P_{руйн}, Н$	Який з протилежних виводів зруйнувався	Характер руйнування
1	37,5	Нижній	Витягнутий із заділки
2	27	Верхній	
3	28	Нижній	
4		Верхній	
5	26	Нижній	Руйнування виводу
6		Верхній	
7	27	Нижній	

Результати експерименту показують, що осьові зусилля, що руйнують вивід, як правило, вище зсувних зусиль, що руйнують контактний вузол.

Зіставлення отриманої в експерименті мінімальної величини зусилля, що руйнує вузол, $P_{min}=26 Н$, з допустимою постачальником осьовим навантаженням на вивід $[P] = 1,2 Н$ показує, що коефіцієнт запасу міцності дорівнює: $n = 2,6 / 0,12 = 21,7$. Припускаючи, що розкриття стику, що призводить до розгерметизації, відбувається при дещо менших осьових зусиллях, то все ж наявність такого великого значення коефіцієнта запасу міцності дає змогу припустити, що розтягувальні зусилля, навіть перевищуючи допустимі в три-чотири рази, що не є причиною розкриття стику, оскільки і тоді коефіцієнт запасу міцності буде не нижче 5. Щоб уявити, чи може при формуванні виводів виникнути розгерметизація через зсувні напруження, необхідно було виміряти осьове зусилля на вивід при формуванні.

4.1.2 Вимірювання зусиль, що діють на вивід при його формуванні.

Зважаючи на неможливість забезпечити збереження тензорезистора на виводі готової мікросхеми при формуванні її виводів, було вирішено провести ці вимірювання, використовуючи спеціальне пристосування для закріплення в ньому пакета виводів ідентично тому, як це зроблено в натурній мікросхемі, але при цьому забезпечуються збереження тензорезистора і проведення вимірювань.

На рис. 4.3 показаний загальний вигляд цього пристосування і схема препарування виводів тензорезисторами МПБ-1 з базою 1 мм.

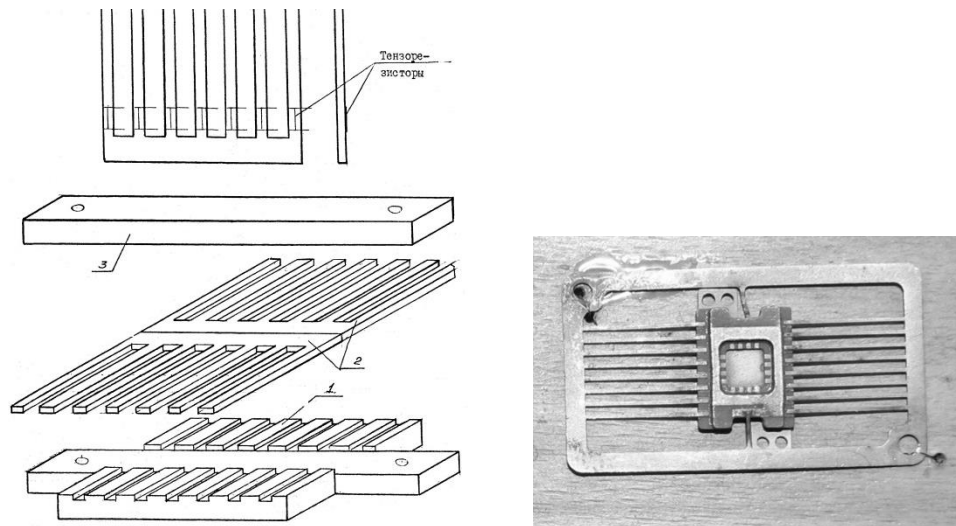


Рис. 4.3 - Пристосування для випробування і схема препарування:

- 1 - імітація корпусу мікросхеми;
- 2 - імітатор виводів (заготовки);
- 3 - імітатор кришки

Тензодатчики розташовувалися на верхній поверхні виводу безпосередньо у защемлень. Частина виводу (на якій розташовувався тензорезистор) завдовжки 2,5 мм від защемлень до краю опорної плити піддавалася тільки розтягуванню при формуванні, а інша частина, розташована за краєм опорної плити, перебувала в тих же умовах і піддавалася тій же деформації при формуванні, що і вивід в натурній

мікросхемі. Це пристосування встановлювалося в формувальний пристрій НВО «Авангард», на якому і проводилося випробування.

До формування виводів виконувалося тарування кожного з тензорезисторів. Для того, щоб випробувати датчики на деформації розтягу було спроектовано і виготовлено пристосування, показане на рис. 4.4.

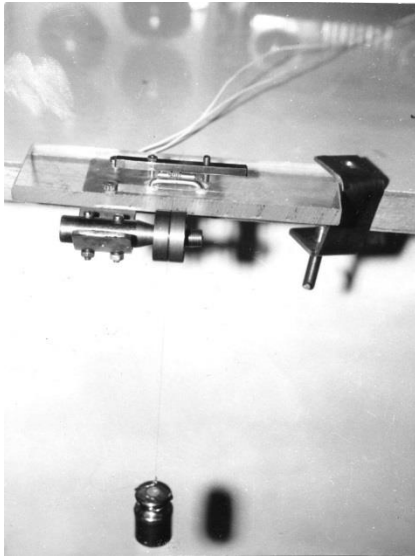


Рис. 4.4 - Пристосування для тарування датчиків на деформації розтягування

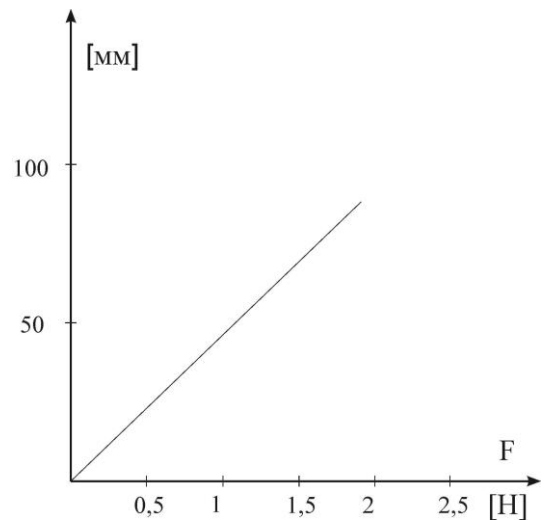


Рис. 4.5 - Результати тарування для одного з тензорезисторів

До вільного кінця виводу припаювали гнучкий і міцний дріт, на який через валик, що розташований на роликівих підшипниках, навішували різної ваги вантажі і при цьому фіксували покази тензорезистора. Оскільки вивід і дріт становили одну пряму, що має невеликий (1°) нахил в сторону валика, то вивід міг піддаватись лише розтягненню. Для реєстрації показів тензорезистора МПБ-1 на стрічці осцилографа Н-115 була розроблена спеціальна приставка до підсилювача 8АНЧ-7М, що дозволяє регулювати струм живлення тензорезисторів і за допомогою цієї приставки велося тензометрування при таруванні, а в подальшому і при формуванні.

Результати тарування для одного з тензорезисторів наведені на рис. 4.6, де видно, що до навантаження, яке дорівнює 250 г залежність деформацій від

зусиль виражається прямою лінією, тобто в цих межах діє закон Гука. Після закінчення тарування пакет виводів без перемонтажа, разом з пристосуванням, встановлювався в формувальний пристрій для запису зусиль при формуванні та обрізки виводів.

За 2-3 с до опускання пуансона з формувальними і відрізними ножами, включалася протяжка осцилографа і вимикалася після виконання формування і відрізання виводів, а на самому екрані стабілізувалися покази датчиків. Зразок осцилографічної стрічки із записом розтягувальних зусиль при формуванні і відрізання виводів показав, що в момент удару відбувається різке відхилення променя, а також ясний характер подальшої зміни навантаження.

Результати вимірювання навантаження на виводи, проведені для десяти комплектів виводів, представлені на рис. 4.6.

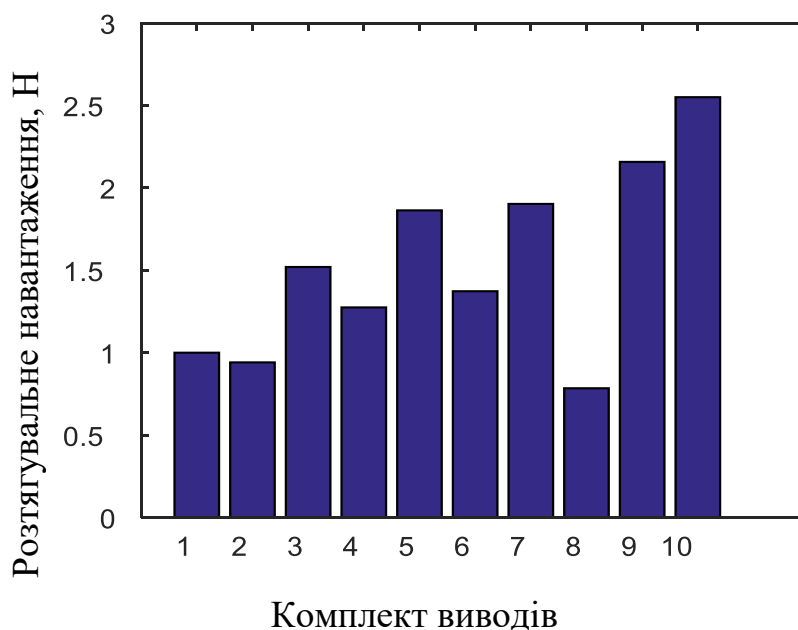


Рис. 4.6 - Розтягувальні навантаження на виводи мікросхем № 401.14-2 при їх формуванні та обрізці

Ці результати свідчать про значний розкид значень розтягувальних зусиль, що обумовлено наявністю люфтів у формувальному пристосуванні, перекосами при русі верхньої траверси уздовж колон, розкидом зусилля

притиснення недеформованої частини виводу, відмінністю в швидкостях опускання пуансона, а, отже, відмінністю в ударному навантаженню при формуванні та відрізанні виводів.

Вимірювання розтягувального навантаження при формуванні і відрізанні 10-ти виводів показало, що величина зусилля розтягу виводу коливається від 80 г до 260 г. Якщо ці величини порівняти з величинами зусиль, необхідних для виривання виводу з контактної вузла, то мінімальний запас міцності буде дорівнює $n = 2,6 / 0,26 = 10$.

Таким чином, результати проведених експериментів не підтверджують припущення про те, що розгерметизація мікросхеми № 401.14-2 відбувається через надмірне осьове навантаження на виводи при виконанні операції формування і відрізання.

4.1.3 Осьові зусилля, що руйнують контактну групу мікросхеми 301.12–1. Випробування на розтяг проводили на показаній на рис. 4.7 установці за допомогою спеціального пристосування, затискаючи корпус мікросхеми по торцях.

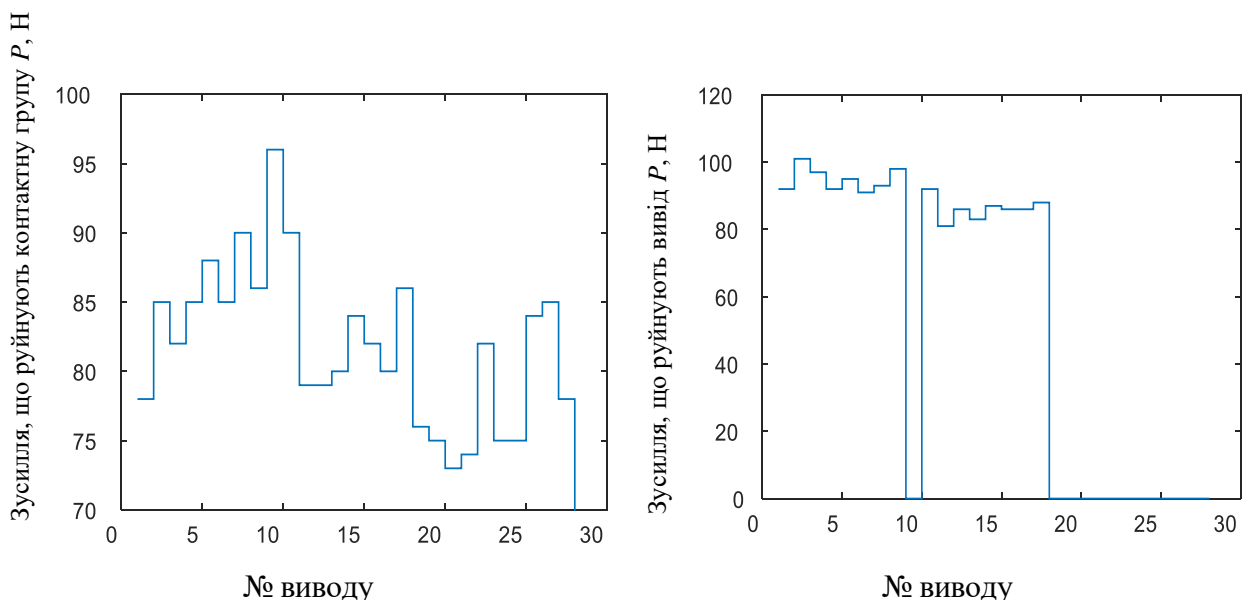


Рис. 4.7 - Осьові зусилля, що руйнують контактну групу мікросхеми № 301.12–1 і її виводи

До вільного кінця виводу мікросхеми припаювали тяговий дріт, через який і здійснювалось осьове навантаження виводу аж до його витягування з склоспаю. Оскільки вивід опинявся міцніше місця з'єднання скла з виводом, було прийнято рішення виміряти величину осьового зусилля, що руйнує вивід, для чого після витягування з склоспаю він випробовувався на розтяг на тому ж пристрої.

На рис. 4.7 представлені результати випробувань виводів, випадково обраних з п'яти зразків виробів № 301.12-1. Дані, представлені на рисунку, свідчать про те, що величина зсувних зусиль, які призводять до витягування виводу зі склоспаю, лежить в межах 70-96 Н; отриманий розкид, мабуть, визначається технологією склоспая і допусками на розміри виводів і отворів.

Ці дані також свідчать про те, що, як правило, зусилля на розрив виводу є вищим зусилля, необхідного для його витягування зі склоспая, тобто зсувного зусилля, що руйнує контакт між виводами і склом.

4.1.4 Вимірювання напружень при формуванні виводів. Для оцінювання впливу формування виводів на напружений стан склоспая було проведено тензометрирування склоспая по торцях у місцях, де утворені «слізки».

На рис. 4.8 показана схема препарування мікросхеми, де видно, що тензорезистор МПБ-1 встановлений в радіальному напрямку так, що половина його чутливого елемента лежить на склі, а половина - на торці виводу і, таким чином він повинен реагувати на всі деформації, що відбуваються в скляній або металевій частинах спаю або їх переміщення один щодо одного.

Експеримент проводили в наступному порядку. Закріпивши препаративну мікросхему у формувальному пристосуванні, підключали один з тензорезисторів до особливо чутливої апаратури, що складається з моста МО-62 і гальванометра М-17/2. Вручну здійснювали вигин виводу (ручна розводка) в

напрямі, що збігається з напрямком чутливого елемента тензорезистора. При цьому жоден з тензорезисторів не зафіксував деформацій, хоча згинання виводів здійснювали з різною швидкістю в будь-яких напрямках. Це дає підставу припустити, що формувальна операція не є причиною розгерметизації по склоспаю.

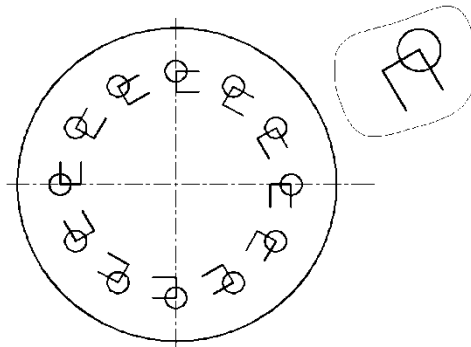


Рис. 4.8 - Схема препарування мікросхеми

4.1.5 Вимірювання внутрішніх напружень в склоспаї. Однією з можливих причин розгерметизації може бути наявність внутрішніх напружень в склоспаї, що виникають після технологічної операції з'єднання виводу зі склом. Можна припустити, що внаслідок відмінності в КТЛР при охолодженні з'єднання коvara і скла не зможуть змінити свої розміри до таких, які були б при їх вільному розширенні або стисненні, і, отже, внаслідок спільності деформацій, повинні будуть піддаватись взаємному силовому впливу, що призводить до напружень. Оскільки розгерметизація відбувається через розтріскування скляної частини, то становить інтерес вимірювання деформацій саме скла. Очевидно, після витягування виводу з склоспаю, зникає їх взаємне вплив, що має призвести до зміни діаметра і довжини кола волокон скла та виводу. Ця зміна може свідчити про величини внутрішніх напружень, що існували в спаї до його руйнування.

Викладені міркування і лягли в основу препарування мікросхеми для вимірювання тиску в склоспаї. На рис. 4.9 показана схема препарування

мікросхеми у торця по «слізки» в місцях виходу з них виводів. За допомогою зубного бору була обрана частина виводу з торця так, що скляна частина на 0,01-0,05 мм виступала над торцем виводу. Тензорезистор був наклеєний так, що його чутливий елемент розташовувався уздовж діаметра скляного кільця, що охоплює вивід.

Записавши опір тензорезистора до руйнування контактної вузла, витягали вивід зі склоспая, після чого знову записували опір тензорезистора, і отримані значення зміни опору переводили в відносні деформації, які потім множили на модуль пружності скла і отримували величину радіальних напружень.

Зважаючи на складність препарування при виконанні експерименту тут проводяться результати вимірювань лише в п'яти контактних вузлах, причому наводяться лише орієнтовні значення напружень через низку причин: по-перше, через похибки препарування; по-друге, через відсутність у виконавця точних даних про марках скла, матеріалу виводу, їх характеристики і відсутність креслення мікросхеми з точними розмірами діаметрів виводів тощо.

За виміряними значеннями, використовуючи теорію Ляме-Гадоліна для товстостінних циліндрів, можна наближено без урахування тиску зовнішнього металу підрахувати значення окружних (тангенціальних) напружень за формулою: $\sigma_t = \sigma_r \left[1 - (R_2 / R)^4 \right]$, де σ_t – окружні напруження; σ_r – радіальні напруження; R_2 – максимальний радіус скляної частини; R – поточний радіус скляної частини.

Звідси випливає, що тангенціальні напруження є протилежними за знаком радіальним і що вони їх перевищують. Епюра розподілу напружень в скляній частині показана на рис. 4.10.

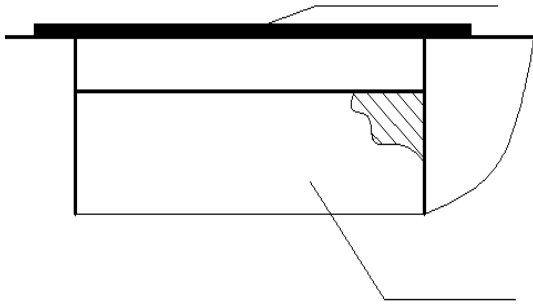


Рис. 4.9 - Схема препарування мікросхеми у торця по «слізки2 в місцях виходу з них виводів

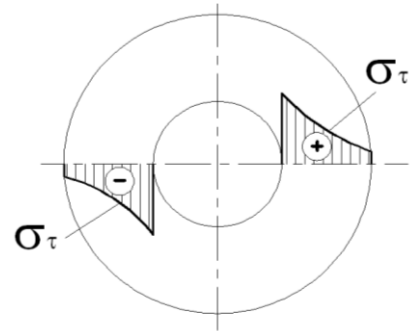


Рис. 4.10 - Епюра розподілу напружень в скляній частині

З огляду те, що довжина чутливої частини тензорезистора дорівнює 1 мм, отримуємо $R_2 = 0,5$ мм, а R приймемо рівним радіусу виводу $R = 0,4$, тоді:

$$\sigma_t = \sigma_r \left[1 - (0,5 / 0,4)^4 \right] = -1,44 \sigma_r.$$

Всі вимірювання після витягування виводу показали, що в радіальному напрямку волокна перемістилися у напрямку до центру кола, тобто товщина скляної частини у вільному стані є більшою, ніж при з'єднанні з виводом; це означає, що в спаяному з виводом стані радіальні напруження є негативними.

Звідси ж (як і з наведеної формули) слідує, що при переміщенні волокон від центру до периферії радіус зростає, а, отже, і довжина кола, тобто, що окружні напруження в склі, в спаяному з виводом стані, є позитивними, тобто скло піддається розтягненню.

Результати експериментів і підрахунків зведені в таблиці 4.2, де напруження визначали за законом Гука $\sigma = \varepsilon \cdot E$ (для скла $E = 0,59 \cdot 10^6$ кгс/см²).

Таблиця 4.2 - Внутрішні напруження в скляній частині склоспая

Радіальні деформації після витягування вивода $\varepsilon \cdot 10^{-4}$	Внутрішні радіальні деформації $\varepsilon \cdot 10^{-4}$	Внутрішні напруження [кгс/см ²]:	
		радіальні σ_r	окружні σ_t
+1,94	-1,94	-114,5	+164,9
+2,84	-2,84	-167,5	+241
+2,5	-2,5	-147,5	+212,4
+1,98	-1,98	-116,8	+168,2
+2,24	-2,24	-132,2	+190,4

Перш ніж аналізувати наведені в таблиці 4.2 дані, відзначимо, що границя міцності скла на розтяг дорівнює $\sigma_B^{poz} = 30 - 90$ МПа, а на стиск $\sigma_B^{cm} = 500 - 2000$ МПа. Таким чином, скло в 10-20 разів гірше опирається розтягненню, ніж стиску, і, отже, особливу небезпеку становлять напруження розтягу.

Представлені в таблиці величини хоча і нижчі за границю міцності скла, але є надзвичайно небезпечними і дають можливість припустити, що причиною випадків розгерметизації все ж може бути розтріскування скла, через високі внутрішні напруження розтягу, що виникають в з'єднанні «скло-вивід». Звичайно, бажано більш ретельно вимірювати напруження, на більшій кількості елементів, а також надати виробнику всі необхідні дані про марки металу, скла, їх міцність, креслення досліджуваних елементів, для більш точної обробки експериментальних даних, але методика може залишитися незмінною. Крім того необхідний огляд під мікроскопом склоспаїв для виявлення концентраторів напружень у вигляді сколів, мікротріщин, рисок та інших дефектів, що різко знижують міцність скла на розтягування. Необхідно також провести уточнення формули для перерахунку радіальних напружень в окружні, врахувавши вплив матеріалу, що має знизити величину. Таким чином, осьові навантаження при формуванні виводів мікросхем № 301.12-1 і № 401-14-2 не є причиною

розгерметизації мікросхем, хоча і можуть перевищувати допустимі; в склоспаї контактного вузла мікросхеми № 301.12-1 мають місце зусилля, які розтягують скло, що може стати причиною розтріскування скла і розгерметизації мікросхем.

4.2 Дослідження напружень, що виникають і накопичуються в вузлах фотодатчиків в процесі їх виготовлення

4.2.1 Вплив термічної обробки на величину залишкових напружень в кришках корпусів фотодатчиків після їх штампування.

Відштамповані кришки корпусів ФД (СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11) були розбиті на дві групи (по 30 штук в кожній), одна з яких піддавалась відпалу за заводською технологією: деталі нагрівалися до температури $T=(950\pm 50)^\circ\text{C}$ в середовищі водню, після чого піч вимикалася і продувалася азотом протягом 1 год; потім деталі виймалися з печі при $T=(150\pm 200)^\circ\text{C}$ і остигали далі при кімнатній температурі.

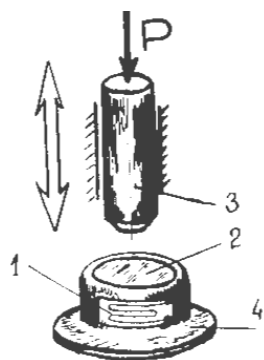


Рис. 4.11 - Схема вибивання скла з кришки ФД:

- 1 – тензорезистор;
- 2 – скло;
- 3 – пуансон;
- 4 – корпус виробу

Друга група деталей відпалу не зазнала. Обидві групи були препаровані тензорезисторами (див. рис. 4.11, після чого відбувалося вимір залишкових напружень після розрізання кришок ФД (рис. 4.12).

Результати експерименту наведені на рис. 4.1 і 4.2 (значення напружень в кришках корпусів ФД без технологічного відпалу). Як видно з рис., величина середніх напружень в таких кришках $\sigma_{cp} = 480,1 \cdot 10^5$ Па. Значення залишкових напружень в кришках корпусів ФД, які пройшли технологічне

відпалювання, режим якого зазначений вище, наведені на рис. 4.14 і 4.15. Як видно з даних, що містяться на рис.4.12, величина середніх напружень в кришках ФД є нижчою.

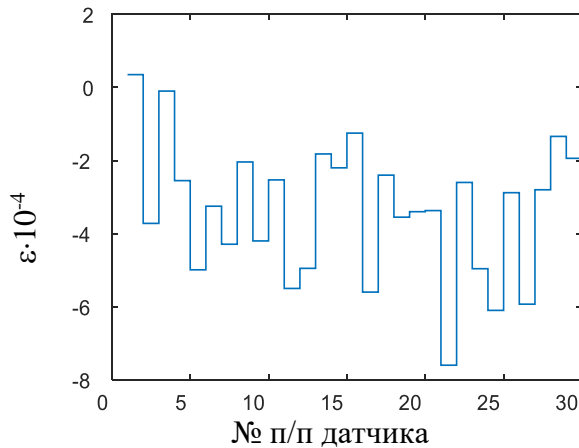


Рис. 4.12 - Відносні деформації в невідпалених кришках корпусів ФД

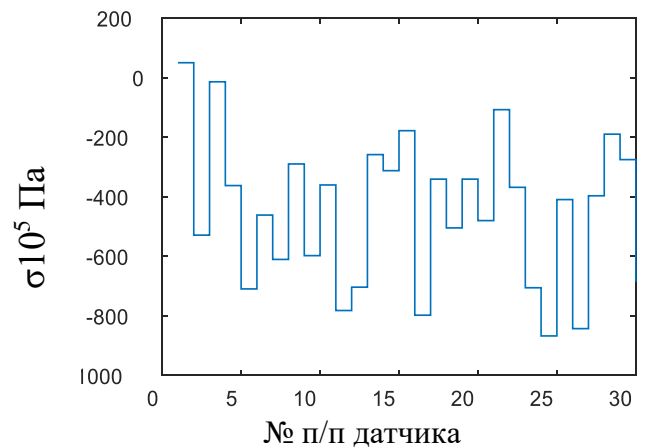


Рис. 4.13 - Напруження в невідпалених кришках корпусів ФД

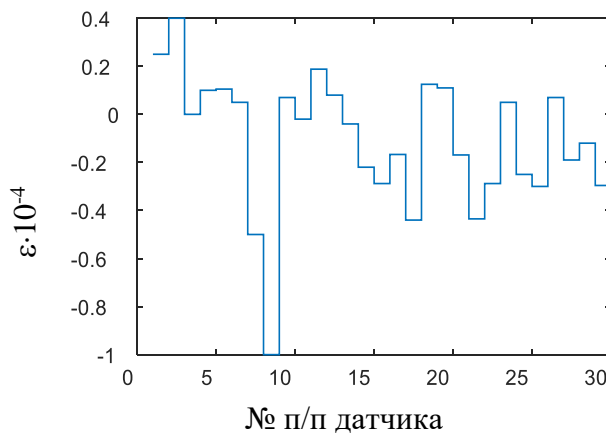


Рис. 4.14 - Відносні деформації в кришках корпусів ФД після операції технологічного відпалу

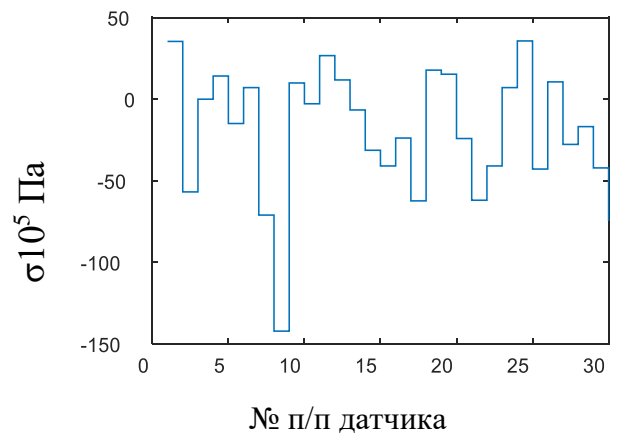


Рис. 4.15 - Напруження в кришках корпусів ФД після операції технологічного відпалу

4.2.2 Вплив відпалу на величину залишкових напружень в кришках корпусів фотодатчиків після операції склоспаювання. Після зварювання скла і кришки корпусу готові вузли ФД були розділені на дві групи - по 20-25 штук в кожній, причому перша з них була препарована тензорезисторами до операції відпалу, а друга - після відпалу за заводською технологією. Для

цього виробу нагрівали в муфельної печі до температури $T = (540-550)^\circ\text{C}$, витримували при цій температурі 1-2 хв і охолоджували разом з пічкою до $T=(60-80)^\circ\text{C}$. Швидкість охолодження складала при цьому 15 град/хв.

Схема препарування кришок представлена на рис. 4.16. Оскільки скло і кришка є єдиною статично невизначеною системою, то визначення внутрішніх напружень, що виникають в результаті з'єднання скла з металевим корпусом, можна здійснити, вимірявши опір тензорезистора в єдиній системі «кришка-скло» і при звільненні їх один від одного.

Таким чином, залишкові напруження і деформації в кришці корпусу, які також характеризують деформації і напруження в сполученні деталь-скло, визначали таким чином: спочатку вимірювали опір тензорезисторів, наклеєний по колу кришки. Потім встановлювали кришку торцем на опорну плиту і легким ударом пуансона вибивали скло, звільняючи тим самим кришку від зв'язку зі склом.

Після вибивання скла знову вимірювали опір тензорезистора, який повинен був змінитися, якщо кришка, звільняючись від зв'язку, змінювала свої лінійні розміри. Ця зміна опору і характеризувала внутрішнє напруження у вузлі «скло-кришка» ФД [50].

Результати вимірювань представлені на рис. 4.18 і 4.19.

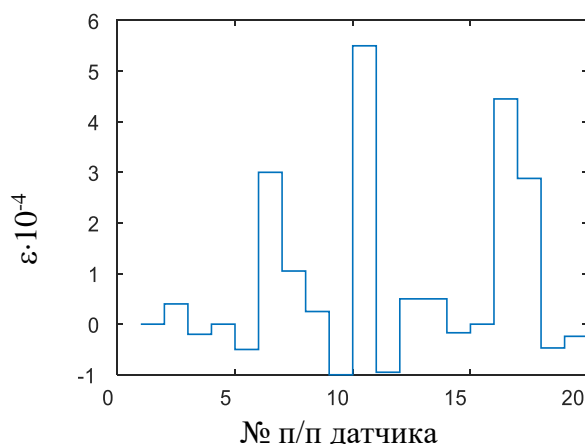


Рис. 4.18 - Відносні деформації в кришках корпусів ФД від взаємодії з металом (до відпалу)

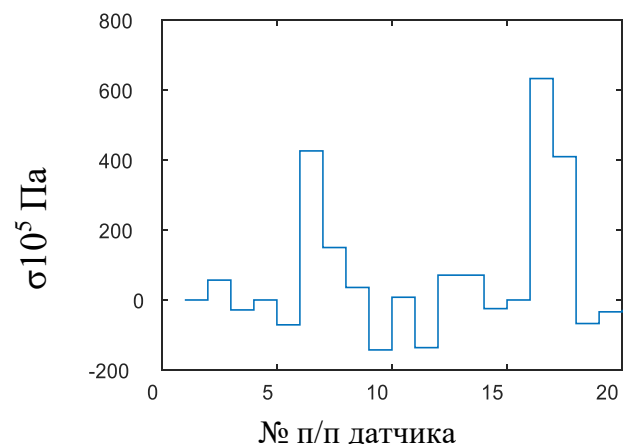


Рис. 4.19 - Внутрішні напруження в кришках корпусів ФД від взаємодії з металом (до відпалу)

Після видалення скла вирішено було перевірити наявність залишкових напружень в матеріалі кришок. Для цього кришки розрізали уздовж твірної за методикою, викладеною вище. Результати експерименту представлені в табл. 4.3 і 4.4.

Дані експерименту, представлені в таблицях 4.3-4.5, свідчать про великий розкид значень напружень в кришках корпусів і стеклах, а також про можливі дії розтягувальних зусиль на скла. Деформації зі знаком "+", свідчать щодо приросту опору датчика після розбивки скла, означають, що радіус і довжина кола кришки збільшувалася, тобто до розбивки скла в кришці діяли стискають окружні напруження і, отже, прагнучи розширитися, кришка розтягувала скло, викликаючи в ньому напруження розтягу. Деформації кришки зі знаком «-» свідчать про те, що скло розпирало кришку і, отже, кришка стискала скло, викликаючи в ньому окружні напруження стиснення.

Таблиця 4.3 – Внутрішні напруження в кришках корпусів ФД від взаємодії скла з металом (після відпалу)

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	0,187	+26,6	11	+1,51	+214,2
2	+0,67	+96	12	+0,58	+83
3	-0,12	-16,8	13	-0,16	-22,3
4	+0,31	+44,1	14	+0,39	+56
5	+1,12	+159,9	15	-0,127	-18
6	+0,78	+110,4	16	+0,8	+114,4
7	+0,51	+73,1	17	+0,04	+6,05
8	-0,24	-34,4	18	-0,33	-47,7
9	-0,04	-6,05	19	-0,08	-11,9
10	+0,03	+4,2	20	+0,93	+131,9

Таблиця 4.4 – Залишкові напруження і деформації в невідпалених кришках ФД після вибивання скла і розрізання кришок

№	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	+3,0	+426,3	11	-2,41	-342
2	-0,5	-71	12	-1,18	-167,7
3	-0,6	-85,3	13	+0,72	+102,3
4	-0,85	-120,5	14	-0,58	-82,4
5	-1,0	-142,1	15	-1,43	-203,1
6	-1,75	-246,9	16	-1,62	-230,2
7	+1,25	+177,6	17	-0,41	-58,2
8	-1,85	-262,6	18	-0,98	-139,2
9	-7,7	-1093,7	19	+2,1	+298,4
10	-0,6	-85,3	20	-5,4	-767,3

Таблиця 4.5 – Залишкові напруження і деформації у відпалених кришках ФД після вибивання скла і розрізання кришок

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	-0,1	-14,2	11	-0,25	-35,6
2	-0,1	-14,2	12	+0,12	+17
3	-0,45	-63,9	13	-0,31	-44
4	-0,25	-35,6	14	-0,48	-68,2
5	+0,4	+56,8	15	-0,12	-17
6	+0,23	+35,5	16	+0,2	+28,4
7	-1,6	-227,4	17	-0,08	-11,4
8	0	0	18	-0,37	-52,6
9	-0,6	-85,3	19	-0,53	-78,1
10	-0,5	-71	20	-0,19	-26,9

Як видно з табл. 4.3, міцність скла на розтяг в 12 разів менше їх міцності на стиск. Тому не слід допускати дії розтягувальних навантажень на скло. Цей висновок неодноразово відзначався багатьма авторами [45, 51-60].

Аналізуючи отримані на кришках корпусів ФД величини окружних відносних деформацій і беручи до уваги, що $\varepsilon_c = \varepsilon_\mu$, отримуємо, що за величиною напружень в склі в стільки разів менше напружень в кришці, у скільки разів модуль пружності скла менше модуля пружності матеріалу кришки. Звідси випливає, що розтягувальні напруження в склі в деяких випадках можуть досягати $147 \cdot 10^5$ Па. Порівнюючи дані, що містяться в таблицях 4.3-4.5, можна дійти висновку, що прийнятий режим відпалу, зменшуючи залишкові напруження в кришці ФД, незначно впливає на величину внутрішніх напружень, що виникають в результаті операції склоспаювання. Виникнення напружень розтягу в склі можливо, наприклад, у випадках, коли $\alpha_c > \alpha_\mu$, і при охолодженні після операції склоспаювання скло, прагнучи зменшити свої розміри на велику величину, ніж метал, буде відчувати розтягування з боку кришки корпусу.

Щоб уникнути напружень розтягу необхідно контролювати величини КТЛР партій матеріалів, що з'єднуються, які йдуть на виготовлення ФД, і відповідно до отриманих даних підбирати узгоджені партії, де α_c було б менше, ніж α_μ . Інший шлях зниження напружень розтягу в склі полягає в ретельному відпрацюванні режиму відпалу після операції склоспаювання, не допускаючи тривалих перерв між цими операціями, щоб уникнути процесів старіння.

4.2.3 Вимірювання залишкових напружень у склі фотодатчиків. За методикою, викладеної вище, було проведено вимірювання залишкових напружень, що виникають в склі вікончастих спаїв фотодатчиків. Результати тензометрування скла представлені в таблицях 4.6-4.8.

Таблиця 4.6 – Внутрішні напруження в склі ФД після операції склоспая до відпалу кришок

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	-0,5	-32,3	11	-7,0	-431,2
2	-2,9	-176,4	12	-6,1	-376,3
3	-1	-61,7	13	+1,5	+92,1
4	+1,17	+72,5	14	+0,19	+11,8
5	-5,79	-357,7	15	-3,78	-233,2
6	-6,67	-411,6	16	-7,5	-466,5
7	+1,3	+80,4	17	-1,9	-117,6
8	+1,13	+69,6	18	+1,75	+107,8
9	-3,25	-201	19	-4,73	-292,0
10	-3	-186,2	20	-2,86	-176,4

Таблиця 4.7 – Внутрішні напруження в склі ФД після операції склоспаювання і після відпалу кришок

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	-1,4	-85,3	11	-2,98	-184,2
2	-1,75	-107,8	12	-0,71	-44,1
3	-0,98	-60,8	13	+0,97	+59,8
4	+0,6	+37,2	14	+1,3	+80,4
5	-1,13	-69,6	15	-1,14	-70,5
6	+0,4	+24,5	16	-2	-125,4
7	+0,29	+17,6	17	-0,89	-54,9
8	-0,8	-49	18	+0,41	+25,5
9	-1,2	-73,5	19	-1,46	-90,2
10	-2,32	-143,1	20	-1,24	-76,4

Таблиця 4.8 – Внутрішні напруження в склі ФД після закінчення технологічного процесу їх виготовлення

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	+0,8	+49	11	-3,89	-240,1
2	-2,86	-176,4	12	-7,78	-480,2
3	-3,68	-227,4	13	+0,43	+26,5
4	-1,2	-74,5	14	+1,6	+98
5	+0,5	+32,3	15	-2,73	-168,6
6	-0,22	-13,7	16	-4,43	-273,4
7	+1,08	+66,6	17	+1,46	+90,2
8	+1,4	+87,2	18	-0,38	-23,5
9	-1,81	-111,7	19	+1,08	+66,6
10	-3,25	-201	20	-1,2	-74,5

Як це видно з даних, що містяться в таблицях 4.6-4.8, операція склоспаювання створює в скляній частині виробів значні за величиною напруження, які в низці випадків є близькими до руйнівальних значень напружень (табл. 4.6). Операція наступного відпалювання (табл. 4.7) істотно знижує напруження в скляній частині корпусів. Але, як це видно з даних, що містяться в таблиці 4.8, наступні технологічні операції сприяють накопиченню напружень в скляній частині виробів. Вимірювання показують, що в більшості випадків ці напруження мають знак «+», тобто є розтягувальними. Ця обставина негативно позначається на міцності скла. У зв'язку з викладеним доцільним і важливим є виявлення тієї технологічної операції, яка створює найбільші залишкові напруження в скляній частині виробу.

4.2.4 Дослідження впливу зварювання кришки і корпусу фотодатчика на величину залишкових напружень у кришці і склі. Для

з'ясування впливу операції зварювання корпусу ФД на величину залишкових напружень в кришці готовий ФД препарували тензорезисторами, як показано на рис. 4.20. Опір тензорезисторів вимірювалося на готових виробках, а також після відрізання кришки фотодатчика алмазним кругом.

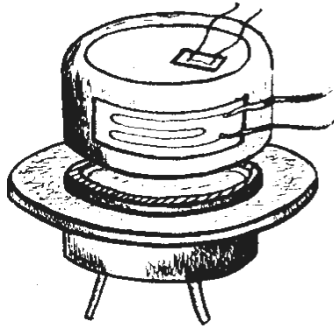


Рис. 4.20 – ФД після відрізання кришки

Була створена установка для розрізання корпусів ФД. Зміна опору тензорезистора до і після здійснення методу деструкції і характеризувало залишкову деформацію, викликану зварювальною операцією. Аналогічним чином вимірювали залишкові деформації і напруження в склі, викликані зварювальною операцією, тільки в цьому випадку вимірювали покази тензорезисторів, наклеєних на скло (рис. 4.21, 4.22). Результати цих експериментів представлені в таблицях 4.9, 4.10.

Таблиця 4.9 – Внутрішні напруження в кришці ФД, викликані зварювальною операцією

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	-1,8	-264,6	11	-3,63	-534,1
2	-1,31	-192,1	12	-2,13	-313,6
3	-3,81	-560,6	13	-1,91	-280,3
4	-2,12	-311,6	14	-2,85	-419,4
5	-1,33	-196	15	-5,73	-842,8
6	-4,73	-695,8	16	-2,43	-356,7
7	-0,5	-74,5	17	-0,93	-137,2
8	-1,23	-180,3	18	-1,97	-290,1
9	-6,7	-980	19	-3,4	-499,8
10	-4,83	-709,5	20	-5,5	-809,5

Результати вимірювань (табл. 4.9 та 4.10), показують, що в корпусах ФД після технологічної операції зварювання виникають значні залишкові напруження. Це особливо небезпечно для скляної частини виробу, де виникають напруження розтягу, величина яких близька до допустимої величини напружень $[\sigma]_p = 98 \cdot 10^5$ Па. Цим і пояснюється той факт, що багато виробів виходять з ладу в результаті механічних поломок під час зберігання на складі, при якому відбувається старіння матеріалу, розвиток мікротріщин.

Таблиця 4.11 – Внутрішні напруження в склі кришки ФД, викликані зварювальною операцією

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	$\sigma \cdot 10^{-5}$ Па
1	+0,84	+51,9	11	+1,39	+86,2
2	+1,1	+66,6	12	+1,51	+93,1
3	+1,38	+85,3	13	+0,41	+25,5
4	+0,33	+20,6	14	+1,0	+61,7
5	+0,19	+11,8	15	+0,24	+14,7
6	+0,57	+35,3	16	+0,9	+55,9
7	+0,86	+52,9	17	+1,33	+82,3
8	+0,27	+16,7	18	+0,73	+45,1
9	+0,51	+37,2	19	+0,6	+38,6
10	+1,21	+74,5	20	+1,46	+90,2

4.3 Вимірювання напружень в корпусах і склі фотодатчиків при висотних випробуваннях

За методикою, викладеною в п. 9.4.3 [11], було проведено експериментальне визначення напружень, що виникають в корпусах і склі

ФД при випробуваннях на висотність. У випробувальній камері створювалося як вакуум, так і надлишковий тиск 0,86 атм. (0,0843 МПа). При створенні негативного тиску в випробувальній камері корпус ФД розпирає надлишковим внутрішнім тиском, і тензорезистори реєстрували додатні деформації, тобто напруження розтягу. При створенні в випробувальній камері надлишкового зовнішнього тиску ФД піддавались деформації стиснення, оскільки тиск у внутрішніх порожнинах корпусів був меншим. У корпусах ФД виникали при цьому напруження стиску.

На рис 4.21 містяться дані, що характеризують напруження, які виникають в корпусах ФД. Розтягувальні напруження в корпусах ФД виникають при створенні розрідження в випробувальній камері. Напруження стиску виникають в корпусах ФД при створенні надлишкового зовнішнього тиску в випробувальній камері.

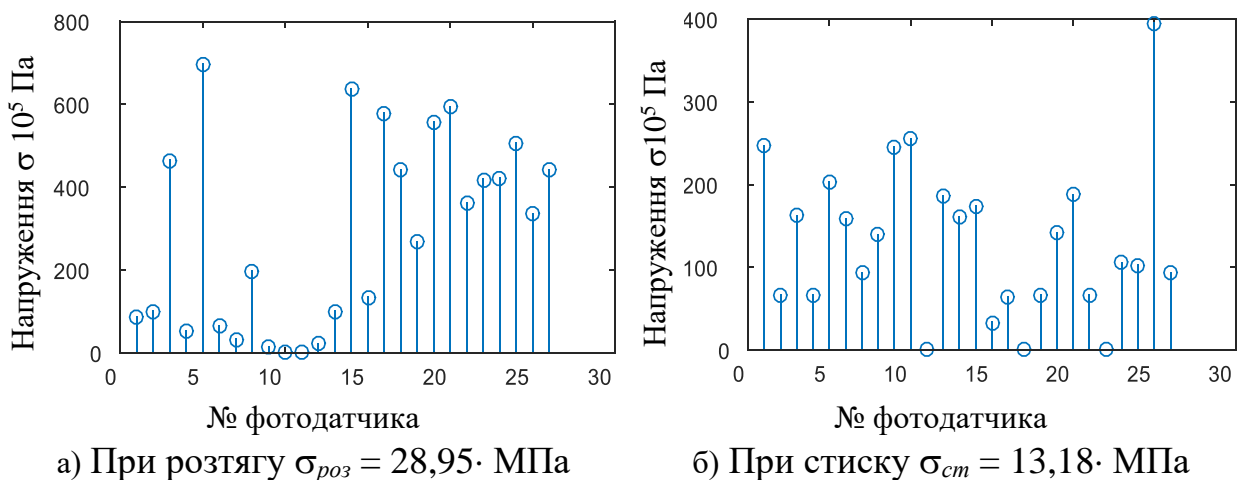


Рис. 4.21. Напруження, що виникають в корпусах ФД при висотних випробуваннях

На рис. 4.22 показані значення напружень, що виникають у склі вікончастих спаїв ФД. Позитивні величини напружень відповідають

надлишковому внутрішньому тиску в корпусах ФД, негативні значення напружень - надлишковому зовнішньому тиску.

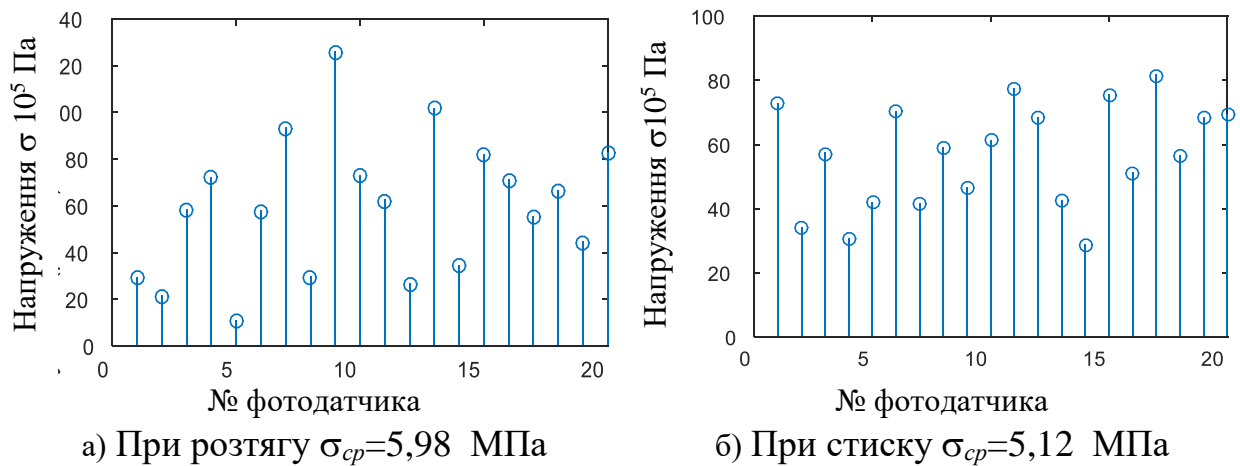


Рис. 4.22. Напруження, що виникають в склі вікончатих спаїв ФД при висотних випробуваннях

Результати експериментів з вимірювання напружень, що виникають при висотних випробуваннях в корпусах плоских мікромодулів (ПММ) представлені на рис. 4.23, де по осі абсцис відкладено значення зовнішнього тиску (висота), а по осі ординат - величини напружень (відносних деформацій), причому кожна з експериментальних точок є середнім арифметичним показів однойменних тензорезисторів для п'яти-семи мікромодулів однакового конструктивного виконання [61].

Аналіз графіків показує, що характер зміни напружень від величини розрідження є різним для досліджуваних конструкцій мікромодулів і місць розташування датчиків. Найменше схильними до дії зміни атмосферного тиску корпусу є монолітні конструкції ПММ, найбільше - порожнисті.

Найбільші напруження зафіксували тензорезистори № 2, розташовані в середині великих сторін корпусу, найменші - № 1 і № 4, розташовані у вершин трьох сходяться ребер (рис. 4.24, 4.25).

Зі збільшенням висоти напруження в корпусах порожнистих конструкцій ММ інтенсивно зростають і при максимальній «висоті», досягнутої в експерименті, що дорівнює 14 км (110 мм рт. ст.), для датчика № 2 досягають 58,8 МПа, тобто нижньої границі текучості для сплаву Т-1 ($\sigma_T = (49-245)$ МПа), з якого виготовлені корпусу ПММ. Для інших місць розташування тензорезисторів характер зміни напружень зі збільшенням висоти в залежності від типу конструкції є аналогічним зображеному на графіку (рис. 4.25), але самі величини напружень є дещо меншими для тензорезистора №3, який зафіксував максимальні напруження ($\sigma = 48,02$ МПа для пустотілої конструкції і суттєво менші - для тензорезисторів № 1 ($\sigma = 11,29$ МПа) і № 4 ($\sigma = 7,84$ МПа) для пустопорожньої конструкції.

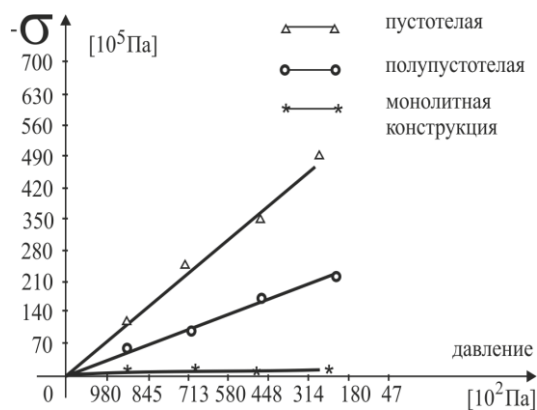


Рис. 4.23 - Залежність деформацій (напружень) корпусу ММ від ступеня розрідження

Якщо взяти до уваги, що вироби можуть працювати і поза земною атмосферою, а також при підвищених температурах, що призводить до ще більшого розширення стінок корпусу від дії внутрішнього тиску і компаунда, то стає очевидним, що матеріал ковпачка Д-1, з якого виготовлені ММ, може працювати в зоні пластичних деформацій

і, отже, для пустотілих, а також напівпустотілих конструкцій ММ є небезпека розгерметизації через відрив стінок корпусу від компаунда. В цьому відношенні перевагу слід віддати монолітним конструкціям ММ.

Вивчення результатів проведеного експерименту показує, що випробування ФД на висотність, основна мета яких полягає в експериментальній перевірці міцності досліджуваних об'єктів, можуть одночасно бути і ефективним методом контролю герметичності корпусів ФД.

Вивчення осцилограм випробувань показує, що корпуси ФД в багатьох випадках не є абсолютно герметичними. Цим пояснюється той факт, що промінь осцилографа після максимального відхилення від лінії відліку (рис. 4.24, ділянка А), що відповідає максимальній деформації корпусу, що знаходиться у вакуумній камері і розпирається внутрішнім тиском, поступово повертається до нульової лінії (див. рис. 4.24, ділянка В).

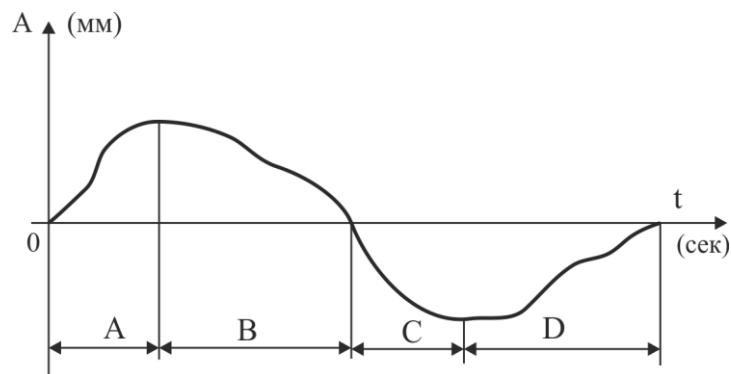


Рис. 4.24 - Відхилення променя осцилографа при використанні методу електротензометрії для контролю герметичності ФД

Після поступового впуску повітря в випробувальну камеру, зрівнюючи тиск в камері і навколишньому просторі, промінь осцилографа відхиляється в протилежну сторону, що відповідає деформації стиснення (знак « \leftarrow » в табл. 4.9, 4.10), оскільки всередині корпусу ФД ще зберігається знижений тиск, а в випробувальній камері, в якій знаходиться корпус ФД, вже нормальний тиск, який дорівнює $0,98 \cdot 10^5$ Па. Цьому стану корпусу відповідає ділянка С (рис. 4.24). Через певний проміжок часу відбувається вирівнювання зовнішнього і внутрішнього тиску корпусу ФД (ділянка D, рис. 4.24), що можливо лише в разі неякісної герметизації корпусу ФД.

Описаний метод контролю герметичності корпусів ФД є досить ефективним і дозволяє без додаткових витрат на препарування виробів і проведення спеціальних технологічних операцій проводити паралельно з

випробуваннями на висотність вибірковий контроль герметичності корпусів вже готових виробів.

4.4 Порівняння теоретичних та експериментальних результатів

Зіставлення розрахункових і теоретичних даних показує, що величини напружень в склі ФД, отримані розрахунковим шляхом, знаходяться в діапазоні значень: $\sigma = -44,825 \dots +4,625$ МПа; експериментальні значення напружень, отримані за методом електротензометрії (див. табл. 4.10), знаходяться в діапазоні: $\sigma = -46,65 \dots +10,78$ МПа, а напруження, отримані за допомогою методу фотопружності (див. табл. 4.10): $\sigma = -44,835 \dots +17,64$ МПа. Видно, що розрахункові значення напружень задовільно узгоджуються з експериментальними. Розрахунок напружень в вікончатих склоспаях за відомими раніше розрахунковим методикам дає значення напружень тільки зі знаком (+) (див. табл. 4.10), в той час як розрахунки за методикою, запропонованої в даній роботі, показують, що:

- розрахункові значення напружень можуть бути і негативними (див. табл. 4.7);
- величини напружень можуть перебувати в інтервалі, що охоплює великий діапазон значень (див. табл. 4.7). Це добре підтверджується експериментально.

Для кришок корпусів ФД значення окружних напружень, отримані розрахунковим шляхом, знаходяться в межах (див. табл. 4.10): $\sigma = -6,807 \dots +65,26$ МПа, напруження, отримані експериментально електротензометрією (див. табл. 4.11): $\sigma = -8,085 \dots +7,82$ МПа. Отримані результати також добре узгоджуються між собою. При роботі виробів в розріджених шарах атмосфери експлуатаційне значення напруження, що

відповідає перепаду тиску $85 \cdot \text{кПа}$, в вікончастому склоспаї $\sigma = -61,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а експериментальні величини напруження $\sigma = -59,78 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Для зручності зіставлення отримані результати зведені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 - Порівняння теоретичних та експериментальних результатів

Вид напруження	Розрахункове значення	Експериментальне значення	
		Метод електротензометрії	Метод фотопружнос
Окружні напруження в корпусах	-68...+652,3	-808...+782	-
Напруження в скляній частині вікончастого склоспаю	Па 448,2...+46,3	-466,5...+107,8	-448,4+176,4
Експлуатаційні напруження в скляній частині вікончастого склоспаю	-61,2	-59,8	-

Висновки до четвертого розділу

1. За результатами проведених експериментальних досліджень напружень, що виникають і накопичуються у вузлах і деталях корпусів ФД: СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11 під час технологічного процесу їх виготовлення, встановлено, що:

– відпалювання кришок корпусів ФД після їх штампування (формування) істотно знижує внутрішні напруження від $\sigma = -48,01 \text{ МПа}$ до $\sigma = -2,2 \text{ МПа}$;

- операція склоспаювання на індукційній установці ЛЗ-13 створює значні (до $\sigma = +14,7 \text{ МПа}$) розтягувальні напруження в скляній частині виробу;

– наступний після операції склоспаювання відпал істотно знижує внутрішні напруження в скляній частині вузла (до $\sigma = -4,9 \text{ МПа}$);

– наступні технологічні операції значно збільшують внутрішнє

напруження в металевій ($\sigma = -84,2$ МПа) і скляній ($\sigma = 9,01$ МПа) частинах.

2. Висотними випробуваннями у вакуумній камері встановлено, що найкращою, з точки зору міцності, є монолітна конструкція ММ, найменш міцною - пустотіла, в матеріалі якої при перепаді тиску $0,84 \dots 105$ Па виникають напруження $\sigma = 58,8$ МПа, що досягають за величиною нижньої границі текучості ($\sigma = 49-245$ МПа) сплаву Д-1.

3. В скляній частині корпусів фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11 при випробуваннях на висотність виникають значні внутрішні напруження $\sigma = 5,98$ МПа, які, додаючись до залишкових напружень, можуть призводити до руйнування виробів. Різниця експериментальних і теоретичних значень напружень при висотних випробуваннях не перевищує 2,5%.

4. Показано, що висотні випробування є ефективним методом контролю герметичності корпусів ФД.

5. Отримані експериментальні результати і їх задовільний збіг з результатами розрахунків підтверджує практичну ефективність теоретичних положень, розроблених у розділі 2, зокрема методики визначення:

- напружень і контактних тисків у вікончастих і бусинкових склоспаях при одночасному впливі тиску і температури;
- експлуатаційних напружень у вузлах і деталях корпусів ФД РЕА;
- сумарних напружень, обумовлених конструкторськими, технологічними та експлуатаційними чинниками.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено причин недостатньої міцнісної надійності металоскляних виробів РЕА виготовлених за технологією склоспаю і розроблено розрахунково-експериментальні методи і засоби досліджень їх міцності на прикладі фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-Отримані результати у вигляді конструкторських і технологічних рекомендацій дають змогу підвищити міцність склоспаїв у РЕА. Найголовніші отримані результати наступні.

1. Обґрунтовано, що при виготовленні бусинкових склоспаїв для зменшення внутрішніх напружень використання скла марки С52-1 є більш ефективним замість скла С48-2.

2. Встановлено, що розкид значень ФМХ матеріалів при створенні РЕА може призводити до збільшення напружень на 20–25 %. Рекомендовано для забезпечення умов міцності металоскляних виробів РЕА вводити вхідний контроль ФМХ матеріалів, що використовуються, обмежуючи розкид цих характеристик заданою наперед областю.

3. Науково обґрунтовано, що індукційний спосіб склоспаю, створює стрибкоподібний тепловий режим, припустимо лише для виробів, які мають невеликий (0,5...1,5 мм) перепад радіуса між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла. Для виробів, у яких цей перепад радіусів дорівнює 4–6 мм і більше, індукційний спосіб склоспаю неприпустимий, бо викликає великий градієнт температури і температурні напруження.

4. Показано границі застосування розрахункової методики визначення температурних напружень. Виявлено, що, експлуатаційні умови, за яких виникають перепади тиску навколишнього середовища, призводять до виникнення додаткових напружень у вузлах і деталях ФД РЕА. Розроблено методику призначення допустимого розкиду геометричних розмірів виробів і ФМХ матеріалів, що використовуються при створенні ФД РЕА.

5. Розроблено методику визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках. Запропоновано методику визначення температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу.

6. Розвинуто енергетичний підхід Гріффітса, на базі якого запропоновано спосіб розрахунку небезпечних руйнівних напружень, відповідних мінімальної і максимальної довжині мікротріщин, що обмежують із заданим ступенем ймовірності інтервал допустимих значень.

7. Розроблено методику визначення сумарних напружень в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів, що впливають на міцність виробів, і методику проектного розрахунку на міцність фотодатчиків РЕА, що містять склоспаї і герметизується компаундами, що враховує конструкторські, технологічні і експлуатаційні фактори, що призводять до виникнення напружень у виробках, розкид геометричних розмірів і ФМХ матеріалів, концентратори напружень

8. Проведено комплекс заходів щодо підбору апаратури для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків: тензометричної апаратури для реєстрації напружені і деформацій у фотодатчиках; спеціальної установки з метою визначення механічних напружень для розрізання корпусів фотодатчиків;

9. Запропоновано комплексну методику тензометрування металоскляних фотодатчиків, що включає етапи наклеювання тензорезисторів, термообробку наклеєних тензорезисторів перед випробуваннями; контроль тензорезисторів та їх захисту від агресивного середовища; багатократне вимірювання опору тензорезисторів для підвищення точності отриманих результатів. Розроблено методику тензометрування фотодатчиків при висотних випробуваннях з використанням спеціальної вакуумної установки.

10. За результатами проведених експериментальних досліджень напружень, що виникають і накопичуються у вузлах і деталях корпусів

фотодатчиків під час технологічного процесу їх виготовлення, встановлено, що:

- відпалювання кришок корпусів фотодатчиків після їх штампування (формування) істотно зніжує внутрішні напруження від $\sigma = -48,01$ МПа до $\sigma = -2,2$ МПа;
- операція склоспаювання на індукційній установці ЛЗ-13 створює значні (до $\sigma = +14,7$ МПа) розтягувальні напруження в скляній частині виробу;
- наступний після операції склоспаювання відпал істотно знижує внутрішні напруження в скляній частині вузла (до $\sigma = -4,9$ МПа);
- наступні технологічні операції значно збільшують внутрішнє напруження в металевій ($\sigma = -84,2$ МПа) і скляній ($\sigma = 9,01$ МПа) частинах.

11. Під час висотних випробувань у вакуумній камері виявлено, що найкращою, з точки зору міцності, є монолітна конструкція, найменш міцною - пустотіла, в матеріалі якої при перепаді тиску $0,84 \dots 105$ Па виникають напруження $\sigma = 58,8$ МПа, що досягають за величиною нижньої межі текучості ($\sigma = 49-245$ МПа) сплаву Д-1. У скляній частині корпусів фотодатчиків при випробуваннях на висотність виникають значні внутрішні напруження $\sigma = 5,98$ МПа, які, додаючись до залишкових напружень, можуть призводити до руйнування виробів. Різниця експериментальних і теоретичних значень напружень при висотних випробуваннях не перевищує 2,5%. Показано, що висотні випробування є ефективним методом контролю герметичності корпусів фотодатчиків.

12. Отримані експериментальні результати і їх задовільний збіг з розрахунковими підтверджує практичну ефективність теоретичних положень, розроблених у розділі 2, зокрема методики визначення напружень і контактних тисків у вікончастих і бусинкових склоспаях при одночасному впливі тиску і температури; експлуатаційних напружень у вузлах і деталях корпусів фотодатчиків РЕА; сумарних напружень, обумовлених конструкторськими, технологічними та експлуатаційними чинниками.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. M. Fakouri Hasanabadi; A. Nemati & A. H. Kokabi (October 2015). "Effect of intermediate nickel layer on seal strength and chemical compatibility of glass and ferritic stainless steel in oxidizing environment for solid oxide fuel cells". *International Journal of Hydrogen Energy*. 40 (46): 16434–16442. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.10.023.
2. Alexander Roth (1997-05-27). *Vacuum Sealing Techniques*. Springer. p. 151. ISBN 978-1-56396-259-2.
3. Merrill L. Minges; Handbook Committee (1989). *Electronic Materials Handbook: Packaging*. CRC Press. ISBN 978-0-87170-285-2.
4. Fred Rosebury (1992-12-31). *Handbook of electron tube and vacuum techniques*. American Institute . of Physics. ISBN 978-1-56396-121-2.
5. "METAL-TO-GLASS JOINT".
6. John Frederik Lancaster (1999). *Metallurgy of welding*. Woodhead Publishing. ISBN 978-1-85573-428-9.
7. Wang Z. et al. Low temperature sealing process and properties of Kovar alloy to DM305 electronic glass //Metals. – 2020. – Т. 10. – №. 7. – С. 941.
8. Dannoux T. L. A., Morse D. L. 3-D glass enclosures for electronic devices : пат. 10131573 США. – 2018.
9. Pogrebenkov V. M. et al. Low-melting Glass-ceramic Composites with Low Linear Thermal Expansion Coefficient for Radio-electronics //Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2015. – Т. 756. – С. 313-318.
10. Kane M. J. et al. BION microstimulators: A case study in the engineering of an electronic implantable medical device //Medical engineering & physics. – 2011. – Т. 33. – №. 1. – С. 7-16.
11. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницкий : ХНУ – 2015. - 313 с.

12. Замирец Н. В. и др. Конструкторско технологическая концепция механизма образования лазерного сварного соединения в узлах герметизации радиоэлектронных модулей для изделий космической и специальной техники //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – №. 2. – С. 34-41
13. Михайлов П. Г., Черенцов М. А., Зубков А. Ф. Неразъемные соединения в измерительных модулях полупроводниковых датчиков силовых параметров //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2011. – Т. 2.
14. Стрельбицкий В. В. Некоторые вопросы надежности слаботочных реле. Вісник ХНУ. Технічні науки – 3 (213). 2014 - С. 75-78
15. Richard B. Belser (1954). "A Technique of Soldering to Thin Metal Films". Rev. Sci. Instrum. 25 (2): 180–183. doi:10.1063/1.1771017.
16. Weissler, G. L; Carlson, Robert Warner (1979). Vacuum physics and technology. ISBN 978-0-12-475914-5.
17. Stefan Döge & Jürgen Hingerl (March 2018). "A hydrogen leak-tight, transparent cryogenic sample container for ultracold-neutron transmission measurements". Rev. Sci. Instrum. 89 (3): 033903. arXiv:1803.10159. Bibcode: 2018RSci...89c3903D. doi:10.1063/1.4996296
18. Журков С. Н. Проблема прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 78–82.
19. Каргин В. А. Влияние объемной концентрации пластификатора на температуру стеклования пластика / В. А. Каргин, Ю. М. Малинский // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 73, № 5. – С. 12–18.
20. Абибов А. Л. Исследование остаточных (внутренних) напряжений в армированном эпоксидном полимере / А. Л. Абибов, Г. А. Молодцов // Механика полимеров. – 1965. – № 4. – С. 70–80.
21. Ваню Г. А. Теория армированных материалов с покрытием / Г. А. Ваню. – К. : Научная мысль, 1971. – 230 с.

22. Исследование внутренних напряжений в стеклопластиках / М. Р. Киселев и др. // Механика полимеров. – 1965. – № 1. – С. 82–88.
23. Hagedorn M. Die Clasharz-Crenzfläche als zentralproblem der glasfasertarten kunststoffe / M. Hagedorn. – Kunststoffe, 1962. Bd 52, H10. – S. 605–612.
24. Haslett W. Shrinkage stresses in glass filament systems / W. Haslett, Mc. Carry J. // Modern plastics. – 1962, vol 40.# 4. H. 135–192.
25. Тернер С. Механические испытания пластмасс / С. Тернер ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.
26. Локтаев В. С. Технология производства микромодулей / В. С. Локтаев, В. Д. Гимпельсон. – М. : Энергия, 1973. – 144 с.
27. Кан К. Н. Оценка работоспособности полимерных компаундов / К. Н. Кан. – Л. : ДДНТП, 1974. – 18 с.
28. Гусев В. П. Технология радиоаппаратуры / В. П. Гусев. – М. : Высшая школа, 1972. – 496 с.
29. Санжаравский А. Т. Методы расчета внутренних напряжений в полимерах и лако-красочных покрытиях / А. Т. Санжаравский // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 135, № 1. – С. 58–60.
30. Харпер Ч. Заливка электронного оборудования синтетическими смолами / Ч. Харпер ; пер. с англ. – М. : Энергия, 1964. – 408 с.
31. Трифонюк В. В. Надежность приборов промышленной электроники / В. В. Трифонюк. – К. : Лыбидь, 1993. – 62 с.
32. Юрков Л. Ф. Переходные стекла и спай в электровакуумной промышленности / Л. Ф. Юрков, В. К. Лeko. – М. : Энергия, 1979. – 125 с.
33. Никольская В. И. Исследование напряжений в плоских спаях сплава 29НК со стеклом С52–1 / В. И. Никольская, С. А. Николаева, В. К. Фролов // Электронная техника. Материалы. – 1974. – Вып. 12. – С. 87–93.
34. Hull A. W. Glass – to metal seals / A. W. Hull, E. E. Burger // Physics. – 1934, Vol. 5, N 12. – P. 384–393.

35. Уайэтт О. Металлы, керамики, полимеры / О. Уайэтт, Д. Дью-Хьюз. – М. : Атомиздат, 1979. – 577 с.
36. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Агнарёв, Л. И. Квитка и др. – К. : Гостехиздат УССР, 1963. – С. 718–731.
37. Таблицы физических величин : справочник / Под ред. И. А. Киконина – М. : Атомиздат, 1976. – 1006 с.
38. Алешин В. С. К вопросу о методах расчета напряжений в цилиндрических металлостеклянных спаях / В. С. Алешин, С. А. Николаева, В. К. Фролов // Электронная техника. Материалы. – 1973. – Вып. 7. – С. 81–92.
39. Бартёнев Г. М. К вопросу влияния прогрева и скорости охлаждения на прочность стекла / Г. М. Бартёнев, А. И. Иванова // Стекло и керамика. – 1955. – № 12. – С. 42–46.
40. Краснощёков Е. А. Задачник по теплопередаче / Е. А. Краснощёков, А. С. Сукомел. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 267 с.
41. Лыков А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1972. – 560 с.
42. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Под ред. Б. Н. Юдаева. – М. : Высшая школа, 1968. – 371 с.
43. Справочник по производству стекла. – М. : Стройиздат, 1963. – Т. 1. – С. 558–585.
44. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 1977. – 479 с.
45. Lillie H. R. Slacking of Stresses in Glass – the Phenomenon Including Toughness, Changing with Temperature / H. R. Lillie // Journ. Amer. Cer. Soc., 1936, Vol. 19, p. 45.
46. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М. : Наука, 1969. – 511 с.

47. Хорна О. Тензометрические мосты / О. Хорна. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 336 с.
48. Ройзман В. П. Экспериментальное определение напряжений, возникающих в корпусах фотодатчиков / В. П. Ройзман, М. И. Хавкин, А. Г. Шайко-Шайковский // Тез. докл. V научн.-метод. межвуз. семинара. – Хмельницкий, 1977. – С. 52–54.
49. Ройзман В.П., Горошко А. В., Лебедь А.В., Петрашук С. А. Механическая прочность в радиоэлектронике // Труды второй междунар. научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" (СИЭТ-2001). – Одесса: Одесский национальный политехнический университет, ОАО „НЕПТУН”. - 2001. - С.221-222.
50. Бартнев Г. М. Прочность закаленных стекол / Г. М. Бартнев, А. И. Иванова // ЖТФ. – 1958. – № 7. – С. 1467.
51. Разрушение : в 7 т. Т. 2 / Ред. Г. Любвич. – М. : Мир, 1975. – 763 с.
52. Иванова А. И. Исследование прочности термически обработанных стекол : дис. канд. техн. наук / А. И. Иванова // ВНИИ стекла. – М., 1954. – 108 с.
53. Criffith A. A. In Proceedings of the I–st International Congress for Applied Mechanics / A. A. Criffith. – Delft, 1924, p. 55–63.
54. Holland F. Glass Resistance to the Destruction / F. Holland, W. Turner // Journ. Soc. Class. Techn. – 1936, Vol. 20, N 80. – P. 279.
55. Miller K. Thermal Dependence of Strength of Glass Pivot / K. Miller. – Zs. Phys., 1931, 69. – N 7–8.
56. Shand E. Experimental Study of Glass Destruction / E. Shand // Journ. Amer. Geram. Soc. – 1954. – Vol. 37. – P. 2.
57. Smekal A. Nature of Mechaical Strength of Glass / A. Smekal // Journ. Soc. Class. Techn. – 1936. – Vol. 20. – P. 432.

58. Smekal A. Method of Measuring of the Velocity of Diffusion of Splits / A. Smekal // Class. Techn., Ber. – 1950. – Vol. 23. – N 3. – P. 58.
59. Stanwort G. Physical Characteristics of Glass / G. Stanwort – Oxford, 1950.
60. Timoshenko S. Histdry of Strength of Materials / S. Timoshenko. – New-York, 1953.
61. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Физматгиз, 1960. – 536 с.

Додаток А. Презентаційні матеріали за результатами виконання дипломної роботи



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра телекомунікацій і радіотехніки

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СКЛОСПАЇВ У ВИРОБАХ РЕА

ДИПЛОМНА РОБОТА

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Виконав: ст. гр. ТРМ-1 Крушинський Д.О.
Керівник: канд. техн. наук, доц. Карпова Л.В.

СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОНІКИ, ВИГОТОВЛЕННИХ СКЛОСПАЮВАННЯМ



Скломпаї (Glass-to-metal seal), які є герметичним щільним з'єднанням скла і металу, є важливим елементом конструкції вакуумних трубок, електричних розрядних трубок, ламп розжарювання, герметичних напівпровідникових діодів, герконів, і металевих або керамічних корпусів електронних компонентів

Рис. 1 – Сучасні елементи РЕА, виготовлені за технологією склоспаювання



Рис. 1 – Електронні елементи, конструктивно виконані як система “вивід-скло-корпус” і система “скло-корпус”

Загальна проблема, на вирішення якої спрямовано дипломну роботу, є підвищення надійності виробів РЕА.

Мета роботи підвищення міцнісної надійності металоскляних виробів електроніки

Об'єктом дослідження є міцнісна надійність виробів електроніки, виготовлених за технологією металоскляного спаювання

Предмет дослідження – розрахунково-експериментальні методи і засоби досліджень міцності виробів електроніки, виготовлених за технологією склоспаю на прикладі фотодатчиків.

Задачі дослідження:

1. Виявити причини проблем міцності бусинкових і вікончастих склоспаїв фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11.
2. Проаналізувати розкид значень ФМХ матеріалів при створенні РЕА і дослідити його можливий вплив на збільшення напружень.
3. Проаналізувати температурні напруження при індукційному способі склоспаювання і обґрунтувати межі його використання в залежності від перепаду радіуса між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла.
4. Встановити зв'язок між експлуатаційними умовами, за яких виникають переломи тиску навколишнього середовища, і виникненням додаткових напружень у вузлах і деталях фотодатчиків.
5. Удосконалити методику визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках та методику визначення температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу.
6. Розвинути енергетичний підхід Гріфїтса для розрахунку небезпечних руйнівних напружень, що відповідають мінімальній і максимальній довжині мікротріщин скла.
7. Визначити сумарні напруження в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів впливу на міцність виробів.
8. Обґрунтувати вибір тензометричної та іншої виміральної апаратури для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків.
9. Розробити комплексну методику тензометрування металоскляних фотодатчиків, у тому числі при висотних випробуваннях з використанням вакуумної установки.
10. Експериментально визначити напруження, що виникають і накопичуються у корпусі фотодатчиків під час їх виготовлення.
11. Експериментально дослідити вплив перепаду атмосферного тиску на внутрішні напруження корпусів фотодатчиків.
12. Перевірити експериментально ефективність розроблених теоретичних методів розрахунку сумарних напружень і тактичних тисків у вікончастих і бусинкових склоспаях, обумовлених конструкторськими, технологічними та експлуатаційними чинниками.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Фотодатчики СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-9, СФ-2-12, СФ-2-16, СФ-2-16, ФРЗ-11 є мікроприладами РЕА, що змінюють свої електричні параметри в залежності від освітленості навколишнього середовища або певної інтенсивності світлового потоку, що реєструють наявність випромінювання певної довжини хвилі.

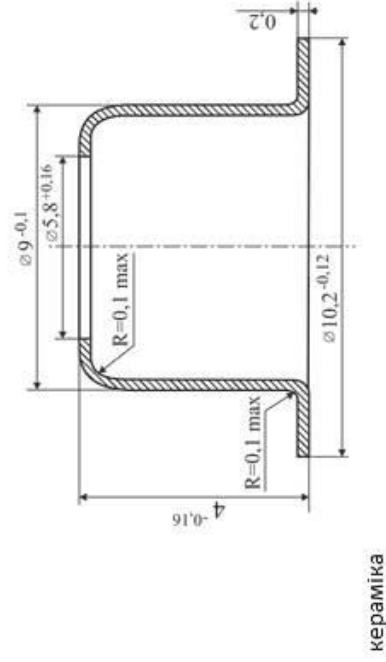
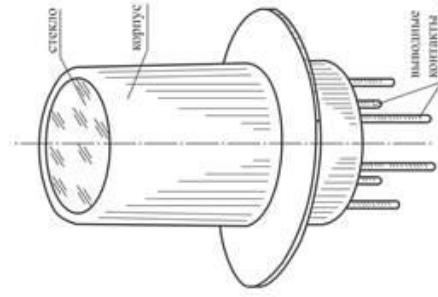


Рис. 1 – Загальний вигляд ФД

Рис. 2 – Габаритні розміри кришки корпусу ФД

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Таблиця 1 Контактні тиски в склоспаї ФД при постійній по радіусу температурі

$N(\alpha, \varphi)$	$P_2 K_2(2+3)$	$K_1(K_2 K_3)$	$\frac{P_2 R_2^2(2+\mu_2)}{E_2(R_2^2 - R_1^2)}$	(1)+(4)	$\frac{1-2\mu_2}{E_2}$	$(1-2\mu_2)R_2^2$	$(1+\mu_2)R_2^2$	(7)+(8)	$\frac{(9)}{(3)}$	$(6)-(10)$	$q = \frac{(5)}{(11)}$
T = 20 °C = const											
C – ном, М – ном											
113·10 ⁻⁶	1,377	0,805·10 ⁻⁶	1,71·10 ⁻⁵	114,7·10 ⁻⁶	0,893·10 ⁻⁶	0,1345	1,053	1,1876	1,475·10 ⁻⁶	2,368·10 ⁻⁶	48,44
C – max, М – min											
339·10 ⁻⁶	1,393	0,71·10 ⁻⁶	1,962·10 ⁻⁵	340,9·10 ⁻⁶	0,738·10 ⁻⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁻⁶	2,407·10 ⁻⁶	140,6
C – min, М – max											
-113·10 ⁻⁶	1,3608	0,8998·10 ⁻⁶	1,512·10 ⁻⁵	111,5·10 ⁻⁶	1,04·10 ⁻⁶	0,1211	1,0632	1,1903	1,323·10 ⁻⁶	2,363·10 ⁻⁶	-47,18
T = 400 °C = const											
C – ном, М – ном											
37·10 ⁻⁶	1,377	0,805·10 ⁻⁶	1,71·10 ⁻⁵	38,71·10 ⁻⁶	0,893·10 ⁻⁶	0,1345	1,053	1,1875	1,415·10 ⁻⁶	2,368·10 ⁻⁶	16,35
C – max, М – min											
111·10 ⁻⁶	1,353	0,71·10 ⁻⁶	1,962·10 ⁻⁵	112,98·10 ⁻⁶	0,138·10 ⁻⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁻⁶	2,407·10 ⁻⁶	46,93
C – min, М – max											
-37·10 ⁻⁶	1,3608	0,8998·10 ⁻⁶	1,512·10 ⁻⁵	355·10 ⁻⁶	1,04·10 ⁻⁶	0,1211	1,0692	1,1903	1,323·10 ⁻⁶	2,363·10 ⁻⁶	-15,02

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Таблиця 1 Контактні тиски в склоспаї ФД при температурі, що лінійно і параболічно змінюється по радіусу

$\frac{2}{3}(2T_c + T_c)$	$\alpha T_c I_{r2}$	$P_2 R_2 (2 - \mu_2)$	$F_{\mu} (R_2^2 R_1)$	(3) (4)	(1) - - (2)+(5)	$\frac{1 - 2\mu_c}{E_c}$	$(1) -$ $2\mu_{ad} \times$ $\times R_2^{-1}$	$(1 + \mu_{ad}) \times$ $\times R_2^2$	(8)+(9) (4)	(7)+(11) ()	$q = \frac{(6)}{(12)}$
---------------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	------------	-----------------------	--------------------------	--	---	----------------	-----------------	------------------------

Лінійний закон зміни												
С - ном, М - ном												
0	809,5·10 ⁶	1,377	0,805·10 ⁶	1,71·10 ⁶	659,3·10 ⁶	0,893·10 ⁶	1,13456	1,053	1,1876	1,475·10 ⁶	2,368·10 ⁶	278,4
0	851·10 ⁶	1,393	0,71·10 ⁶	1,962·10 ⁶	771,6·10 ⁶	0,738·10 ⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁶	2,407·10 ⁶	320,6
0	732·10 ⁶	1,3608	0,8998·10 ⁶	1512·10 ⁶	0,735·10 ⁶	1,04·10 ⁶	0,1211	1,0692	1,1903	1,3228·10 ⁶	2,363·10 ⁶	273,1
0	869,5·10 ⁶	11,377	0,805·10 ⁶	1,71·10 ⁶	969,7·10 ⁶	0,893·10 ⁶	0,13456	1,053	1,1876	1,475·10 ⁶	2,368·10 ⁶	409,5
0	851·10 ⁶	1,399	0,71·10 ⁶	1,962·10 ⁶	1009·10 ⁶	0,738·10 ⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁶	2,407·10 ⁶	457,4
0	792·10 ⁶	1,3608	0,8998·10 ⁶	1,512·10 ⁶	944,5·10 ⁶	1,04·10 ⁶	0,1211	1,0692	1,1903	1,3228·10 ⁶	2,363·10 ⁶	399,7
С - max, М - min												
С - min, М - max												
Температура по склусу змінюється за законом параболі												
С - ном, М - ном												
0	809,5·10 ⁶	11,377	0,805·10 ⁶	1,71·10 ⁶	969,7·10 ⁶	0,893·10 ⁶	0,13456	1,053	1,1876	1,475·10 ⁶	2,368·10 ⁶	409,5
0	851·10 ⁶	1,399	0,71·10 ⁶	1,962·10 ⁶	1009·10 ⁶	0,738·10 ⁶	0,148	1,037	1,1848	1,6687·10 ⁶	2,407·10 ⁶	457,4
0	792·10 ⁶	1,3608	0,8998·10 ⁶	1,512·10 ⁶	944,5·10 ⁶	1,04·10 ⁶	0,1211	1,0692	1,1903	1,3228·10 ⁶	2,363·10 ⁶	399,7
С - max, М - max												

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Таблиця 1 Фізико-механічні характеристики матеріалів

Матеріал	Модуль пружності $E \cdot 10^{11}$ Па			Коефіцієнт Пуассона μ			ТКЛР $\alpha (10^{-6} \text{ Град.}^{-1})$		
	min	max	середнє	min	max	середнє	min	max	середнє
Сплав 29НК	1,47	1,86	1,66	0,28	0,32	0,3	5,9	6,4	6,2
Скло С48-2	0,49	0,64	0,56	0,24	0,26	0,25	4,7	5,0	4,8
Скло С52-1	0,49	0,64	0,57	0,24	0,26	0,25	5,1	5,4	5,2

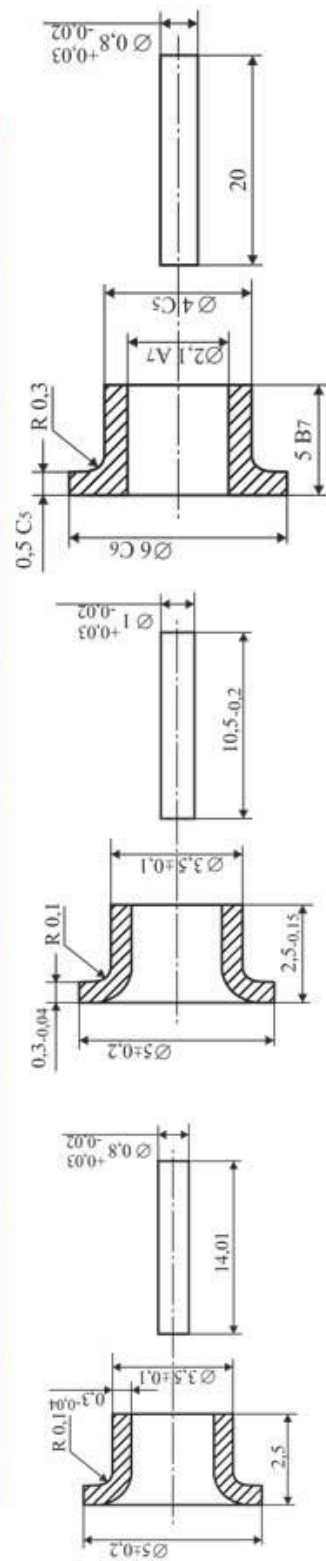


Рис. 1 - Дріт і оправлення, що застосовуються для спаїв

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Таблиця 1 - Різниця КТЛР скла і ковара

Марка скла	$\Delta\alpha_{\min} \times 10^{-6} \text{ Град.}^{-1}$	$\Delta\alpha_{\max} \times 10^{-6} \text{ Град.}^{-1}$	$\Delta\alpha_{\text{ном}} \times 10^{-6} \text{ Град.}^{-1}$
C52-1	5,9 - 5,35 = 0,55	6,4 - 5,1 = 1,3	6,15 - 5,2 = 0,95
C48-2	5,9 - 5,0 = 0,9	6,4 - 4,7 = 1,7	6,15 - 4,8 = 1,35

Контактні тиски, радіальні, окружні і осьові напруження в бусинкових склоспаях

$$Q = \frac{\Delta T(\alpha_m - \alpha_c) + \frac{qR_1^2(2 - \mu_c)}{E_c(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{F_2\rho_2^2(2 - \mu_m)}{E_m(\rho_2^2 - \rho_1^2)}}{(1 - 2\mu_c)R_2^2 + (1 + \mu_c)R_1^2} + \frac{(1 - 2\mu_m)\rho_1^2 + (1 + \mu_m)\rho_2^2}{E_m(\rho_2^2 - \rho_1^2)}$$

$$q = \frac{\Delta T(\alpha_m - \alpha_c) + \frac{QR_2^2(2 - \mu_c)}{E_c(R_2^2 - R_1^2)}}{1 - 2\mu_m + \frac{(1 - 2\mu_c)R_1^2 + (1 + \mu_c)R_2^2}{E_m(R_2^2 - R_1^2)}}$$

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ МІЦНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ КОМПАУНДОВАНИХ КЕРАМІЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ ПРИ ЇХ ТЕРМОЦИКЛУВАННІ МЕТОДОМ АЕ

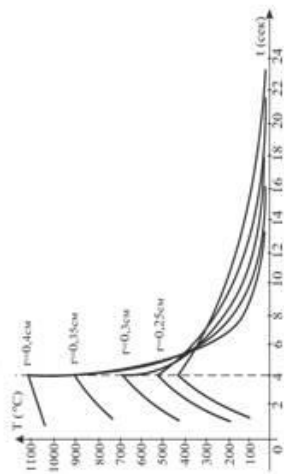


Рис. 1 - Зміна температури по радіусу вікончатого склоспая в залежності від часу

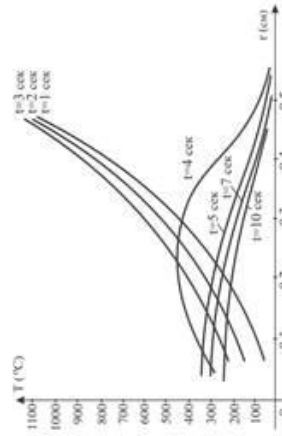


Рис. 2 - Зміна температури по радіусу вікончатого склоспая

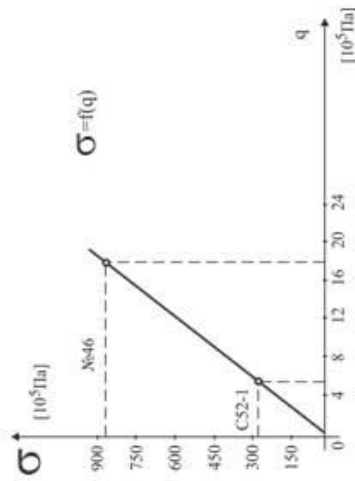


Рис. 3 - Радіальні напруження в вікончатій скляній пластині корпусу ФД в залежності від перепаду тиску навколишнього середовища

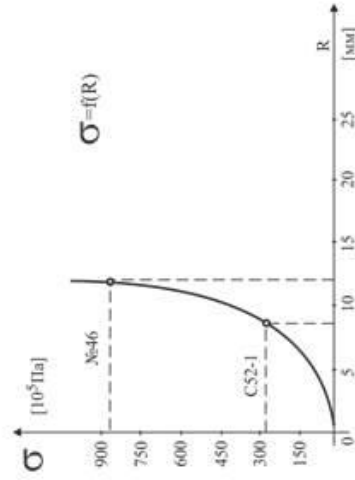


Рис. 4 - Залежність радіальних напружень в вікончастому склоспаї від радіуса пластини

МЕТОДИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ РЕА

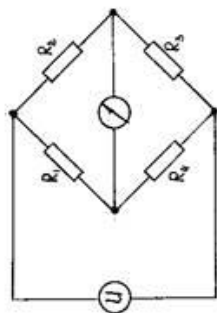


Рис. 1 – Схема тензометричного приладу

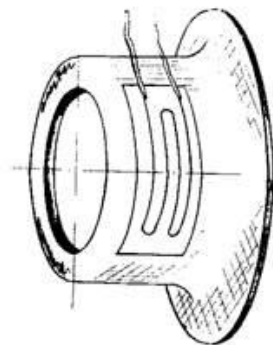


Рис. 2 – Схема наклеювання тензорезистора на корпус ФД

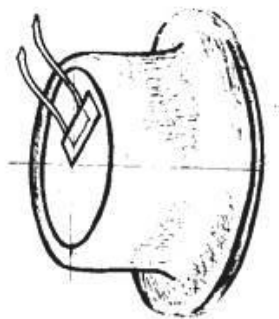


Рис. 3 – Препарування скла кришки ФД малобазним тензорезистором

Використовувалася наступна апаратура і обладнання, частина з якої є стандартною, а частина спеціально доопрацьованою або виготовленою для необхідних вимірювань. У роботі використані: міст постійного струму МО-62, дзеркальний вольтметр типу М197/1, магазин опорів МСР-63, випрямляч ВСА-5, термостат СС-200, установка для різання корпусів ФД, знімні абразивні диски, поліарископ-поляриметр ПКС-250, тензорезистори П5-4Т, тензорезистори МПБ-1, плавикова кислота, міст АС-1, клей БФ-2.

МЕТОДИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ РЕА

Контроль тензорезисторів.

1. Деталі розгорталися до обгортки.
2. Перевіряли опір ізоляції тензорезистора по відношенню до металізації виробу приладом типу МОМ-1 або аналогічним. Опір ізоляції має бути не нижче 50 МОм.
3. Перевірявся опір тензорезистора мостом постійного струму класу 0,1.
4. При відмінності виміряного опору від зазначеного на тензорезисторами більш, ніж на 10 МОм, тензорезистор переклеювати, його замінювали новим.

Захист тензорезисторів від агресивного середовища

1. На тензорезистори і їх виводи наносилось захисне покриття від агресивного середовища 2-3 шари. Захисне покриття складається з епоксидної смоли ЕД-5 100 вагових частин; поліетілполіоміна 8; дібутилфталлата 10.
2. Захисний шар з епоксидного клею просушується протягом 24 годин при температурі 20-23° С і нормальній вологості.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ

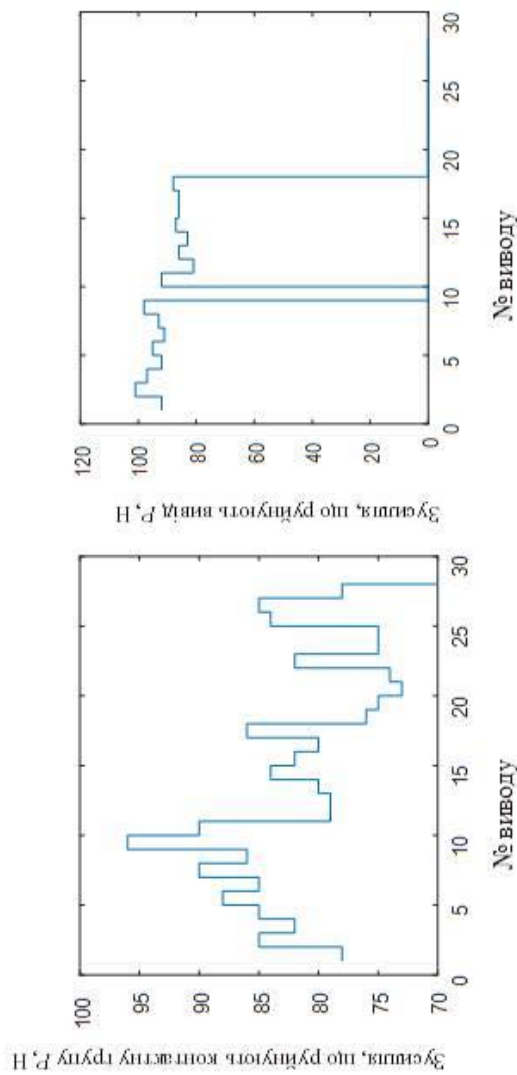


Рис. 1 - Осьові зусилля, що руйнують контактну групу мікросхеми № 301.12-1 і її виводи

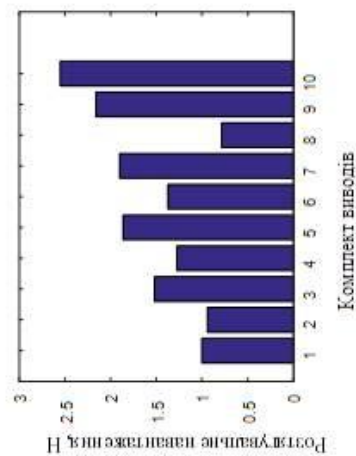


Рис. 2 - Розтягувальні навантаження на виводи мікросхем № 401.14-2 при їх формуванні та обрізці

Вимірювання напружень при формуванні виводів.

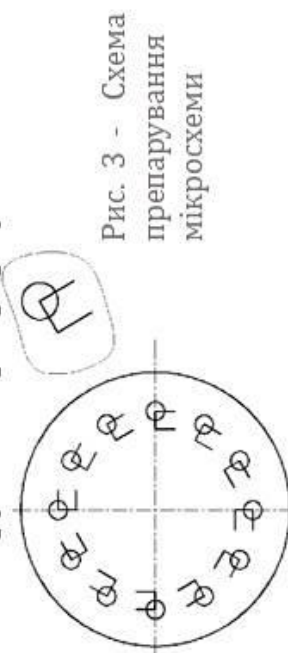


Рис. 3 - Схема препарування мікросхеми

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ

Таблиця 1 – Внутрішні напруження в склі ФД після операції склюся до відпалу кришок

№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$	№ п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-4}$
1	-0,5	11	-7,0
2	-2,9	12	-6,1
3	-1	13	+1,5
4	+1,17	14	+0,19
5	-5,79	15	-3,78
6	-6,67	16	-7,5
7	+1,3	17	-1,9
8	+1,13	18	+1,75
9	-3,25	19	-4,73
10	-3	20	-2,86

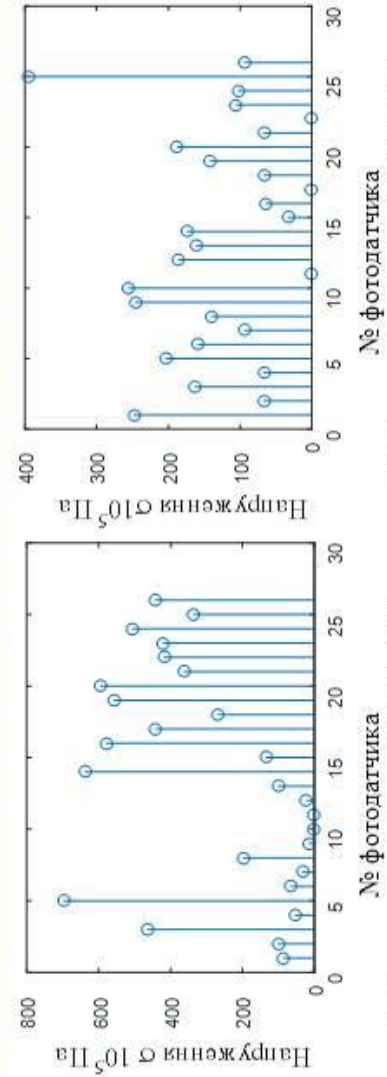


Рис. 2 - Напруження, що виникають в корпусах ФД при висотних випробуваннях

Наукова новизна отриманих результатів

1. *Вперше експериментально встановлено, що індукційний спосіб склоспаювання створює стрибкоподібний тепловий режим. Для виробів, у яких перепад радіусів дорівнює 4–6 мм і більше, індукційний спосіб склоспаювання є неприпустимим, оскільки викликає великий градієнт температури і температурні напруження.*
2. *Виявлено факт виникнення додаткових напружень у вузлах і деталях фотодатчиків при перепадах тиску навколишнього середовища.*
3. *Розвинуто розрахунково-експериментальний метод визначення законів зміни температури по радіусу фотодатчика при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках, який відрізняється врахуванням температурних напружень в круглих вільних і затиснених пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу, що дає змогу підвищити точність методу.*
4. *Розвинуто енергетичний підхід Гріффітса, на базі якого запропоновано метод розрахунку небезпечних руйнівних напружень, що відповідають мінімальній і максимальній довжині мікротріщин, які обмежують із заданим ступенем ймовірності інтервал допустимих значень, що дало можливість підвищити ефективність конструювання і виготовлення, а також міцнісну надійність металоскляних елементів РЕА.*

Практичне значення отриманих результатів

1. Обґрунтовано, що при виготовленні бусинкових склосплавів для зменшення внутрішніх напружень використання скла марки С52-1 є більш ефективним замість скла С48-2. Рекомендовано для забезпечення умов міцності металоскляних виробів РЕА вводити вхідний контроль ФМХ матеріалів, що використовуються, обмежувати розкид цих характеристик наперед заданою областю.
2. Знайдено границі застосування розрахункової методики визначення температурних напружень. Методика призначена допустимого розкиду геометричних розмірів виробів і ФМХ матеріалів, що використовуються при створенні фотодатчиків РЕА дає можливість підвищити міцність конструкцій при виготовленні.
3. Розроблені практичні методики:
 - визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склосплавів на індукційних установках;
 - визначення температурних напружень в круглих вільних і записаних пластинах деталей РЕА при довільних статистичних законах розподілу температури по радіусу;
 - визначення сумарних напружень в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних факторів, що впливають на міцність виробів;
 - проектного розрахунку на міцність фотодатчиків РЕА, що містять склоспай і герметизується компаундами, що враховує конструкторські, технологічні і експлуатаційні фактори, що призводять до виникнення напружень у виробках;
 - тензометрування металоскляних фотодатчиків, що включає етапи наклеювання, термообробку і контроль тензорезисторів та їх захист від агресивного середовища;
 - тензометрування фотодатчиків при висотних випробуваннях з використанням спеціальної вакуумної установки.
4. Підбрано апаратуру для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків: тензометричної апаратури для реєстрації напружень і деформацій у фотодатчиках та спеціальної установки з метою визначення механічних напружень, для розривання корпусів фотодатчиків. Апаратура дає можливість здійснювати висотні випробування.
5. Встановлено, що:
 - відпалювання кришок корпусів фотодатчиків після їх штампування істотно зніжує внутрішні напруження від $\sigma = -48,01$ МПа до $\sigma = -2,2$ МПа;
 - операція склоспаювання на індукційній установці ЛВ-13 створює значні (до $\sigma = +14,7$ МПа) розтягувальні напруження в скляній частині виробу;
 - наступний після операції склоспаювання відпал істотно знижує внутрішні напруження в скляній частині вузла (до $\sigma = -4,9$ МПа);
 - наступні технологічні операції значно збільшують внутрішні напруження в металевій ($\sigma = -84,2$ МПа) і скляній ($\sigma = 9,01$ МПа) частинах.
6. Встановлено, що найкращою, з точки зору міцності, є монолітна конструкція, найменш міцною є порожня, в матеріалі якої при перепаді тиску $0,84 \dots 1,05$ Па виникають напруження $\sigma = 58,8$ МПа, що досягають за величиною нижньої границі текучості ($\sigma = 49-245$ МПа) сплаву Д-1. У скляній частині корпусів фотодатчиків при випробуваннях на висотність виникають значні внутрішні напруження $\sigma = 5,98$ МПа, які, додаючись до залишкових напружень, можуть призводити до руйнування виробів.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено причини недостатньої міцнісної надійності металоскляних виробів РЕА виготовлених за технологією склоспаю і розроблено розрахунково-експериментальні методи і засоби досліджень їх міцності на прикладі фотодатчиків СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-8, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11. Отримані результати у вигляді конструкторських і технологічних рекомендацій дають змогу підвищити міцність склоспаїв у РЕА. Найголовніші отримані результати наступні.

1. Обтунтовано, що при виготовленні бусиноквих склоспаїв для зменшення внутрішніх напружень використання скла марки С52-1 є більш ефективним замість скла С48-2.

2. Встановлено, що розкид значень ФМХ матеріалів при створенні РЕА може призводити до збільшення напружень на 20–25 %. Рекомендовано для забезпечення умов міцності металоскляних виробів РЕА вводити вхідний контроль ФМХ матеріалів, що використовуються, обмежуючи розкид цих характеристик заданою наперед областю.

3. Науково обтунтовано, що індукційний спосіб склоспаю, створює стрибкоподібний тепловий режим, припустимо лише для виробів, які мають невеликий (0,5...1,5 мм) перепад радіуса між зовнішньою і внутрішньою поверхнями скла. Для виробів, у яких цей перепад радіусів дорівнює 4–6 мм і більше, індукційний спосіб склоспаю неприпустимий, бо викликає великий градієнт температури і температурні напруження.

4. Показано границі застосування розрахункової методики визначення температурних напружень. Виявлено, що, експлуатаційні умови, за яких виникають перепади тиску навколишнього середовища, призводять до виникнення додаткових напружень у вузлах і деталях ФД РЕА. Розроблено методику визначення допустимого розкиду геометричних розмірів виробів і ФМХ матеріалів, що використовуються при створенні ФД РЕА.

5. Розроблено методику визначення законів зміни температури по радіусу виробу при створенні вікончастих склоспаїв на індукційних установках. Запропоновано методику визначення температурних напружень в круглих вільних і записаних пластинах деталей РЕА при довірливих статистичних законах розподілу температури по радіусу.

6. Розвинуто енергетичний підхід Гріффітса, на базі якого запропоновано спосіб розрахунку небезпечних руйнівних напружень, відповідних мінімальній і максимальній довжині мікротріщин, що обмежують із заданим ступенем ймовірності інтервал допустимих значень.

7. Розроблено методику визначення сумарних напружень в вузлах фотодатчиків з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів, що впливають на міцність виробів, і методику проектного розрахунку на міцність фотодатчиків РЕА, що містять склоспаї і герметизуються компаундами, що враховує конструкторські, технологічні і експлуатаційні фактори, що призводять до виникнення напружень у виробках, розкид геометричних розмірів ФМХ матеріалів, концентраторів напружень

ВИСНОВКИ

8. Проведено комплекс заходів щодо підбору апаратури для проведення випробувань металоскляних фотодатчиків: тензометричної апаратури для реєстрації напружені і деформації у фотодатчиках; спеціальної установки з метою визначення механічних напружень для розрізання корпусів фотодатчиків;
9. Запропоновано комплексну методику тензометрування металоскляних фотодатчиків, що включає етапи наклеювання тензорезисторів, термообробку наклеєних тензорезисторів перед випробуваннями; контроль тензорезисторів та їх захисту від агресивного середовища; багаторазне вимірювання опорю тензорезисторів для підвищення точності отриманих результатів. Розроблено методику тензометрування фотодатчиків привисотних випробуваннях з використанням спеціальної вакуумної установи.
10. За результатами проведених експериментальних досліджень напружень, що виникають и накопичуються у вузлах і деталях корпусів фотодатчиків під час технологічного процесу їх виготовлення, встановлено, що:
 - відгалуження кришок корпусів фотодатчиків після їх штампування (формування) істотно зніжує внутрішні напруження від $\sigma = -48,01$ МПа до $\sigma = -2,2$ МПа;
 - операція склостаювання на індукційній установці ЛЗ-13 створює значні (до $\sigma = +14,7$ МПа) розтягувальні напруження в скляній частині виробу;
 - наступний після операції склостаювання віддалі істотно знижує внутрішні напруження в скляній частині вузла (до $\sigma = -4,9$ МПа);
 - наступні технологічні операції значно збільшують внутрішні напруження в металевій ($\sigma = -84,2$ МПа) і скляній ($\sigma = 9,01$ МПа) частинах.
11. Під час висотних випробувань у вакуумній камері виявлено, що найкращою, з точки зору міцності, є монолітна конструкція, найменш міцною - пустоїла, в матеріалі якої при перепаді тиску $0,84 \dots 1,05$ Па виникають напруження $\sigma = 58,8$ МПа, що досягають за величиною нижньої межі текучості ($\sigma = 49-245$ МПа) сплаву Д-1. У скляній частині корпусів фотодатчиків при випробуваннях на висотність виникають значні внутрішні напруження $\sigma = 5,98$ МПа, які, додаючись до залишкових напружень, можуть призводити до руйнування виробів. Різниця експериментальних і теоретичних значень напружень при висотних випробуваннях не перевищує 2,5%. Показано, що висотні випробування є ефективним методом контролю герметичності корпусів фотодатчиків.
12. Отримані експериментальні результати і їх задовільний збіг з розрахунковими підтверджує практичну ефективність теоретичних положень, розроблених у розділі 2, зокрема методику визначення напружень і контактних тисків у вікончастих і буцинкових склоспаях при одночасному впливі тиску і температури; експлуатаційних напружень у вузлах і деталях корпусів фотодатчиків РЕА; сумарних напружень, обумовлених конструкторськими, технологічними та експлуатаційними чинниками.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ !

Додаток Б. Матеріали апробації наукових результатів отриманих у дипломній роботі

УДК 519.25

ГОРОШКО А. В.
КОВТУН І.І.
КРУШИНСЬКИЙ Д. О.
Хмельницький національний університет

Розрахунково-експериментальні методи оцінювання міцності металоскляних виробів РЕА

Анотація. В статті представлені результати досліджень міцності склоспаїв у виробках електронної техніки. Проведено розрахунок допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів вузла склоспаю, що забезпечують виконання умови міцності склоспаю, і запропоновано здійснювати вхідний контроль фізико-механічних характеристик використаних матеріалів з подальшим погодженням їх партій. Запропонована методика проектного розрахунку на міцність вузлів металоскляних фотодатчиків РЕА.

Ключові слова: склоспай, фотодатчик, міцність, електронні вироби

GOROSHKO A. V.,
KOVTON I. I.
KRUSHYNSKYI D. O.,
Khmelnitskyi National University

CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHODS ASSESSING THE STRENGTH OF GLASS-TO-METAL PRODUCTS OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Abstract. The experience of using metal-glass electronics products indicates their low reliability due to mechanical destruction. As a rule, failure is caused by the insufficient ability of incandescent glass to wet the metal to form a tight bond, as well as by the inconsistent thermal expansion of glass and metal, which can cause a decrease in strength and depressurization of the seal when the assembly is cooled. The paper presents the results of studies of the strength of glass-sealed in electronic products. It is shown that the theory of thick-walled Lamé cylinders can be used for the calculation. The calculation of the permissible scatter of the physical and mechanical characteristics of the materials of the glass-weld assembly, ensuring the fulfillment of the strength condition of the glass-weld, was carried out, and it was proposed to carry out the incoming control of the physical and mechanical characteristics of the materials used with the subsequent approval of their batches. A method of design calculation for the strength of units of metal-glass photosensors of electronic equipment is proposed.

Keywords: Glass-to-metal seal, Photosensor, Strength, Electronic Products

Постановка проблеми. Склоспаї (Glass-to-metal seal), які є герметичним щільним з'єднанням скла і металу, є важливим елементом конструкції вакуумних трубок, електричних розрядних трубок, ламп розжарювання, герметичних напівпровідникових діодів, герконів, герметичних скляних вікон в металевих корпусах і металевих або керамічних корпусів електронних компонентів. Досвід експлуатації виробів РЕА, виготовлених за технологією склоспаю показує, що значна частина з них виходить з ладу через механічне руйнування. Як правило, воно викликане недостатньою здатністю розпеченого скла змочувати метал для утворення щільного зв'язку, а також неузгодженим температурним розширенням скла і металу, що може викликати зниження міцності і розгерметизацію ущільнення при охолодженні складання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У роботі [1] розроблено нову конструкторсько-технологічну концепцію герметизації радіоелектронних модулів в корпусах з алюмінієвих сплавів з використанням багатофункціонального покриття на основі Ni і Si, що отримується імпульсною лазерною наплавкою. Отримано формулу для визначення рухливості наплавлення одного шару, з урахуванням якої знаходять загальну тривалість лазерного наплавлення і утворення багатофункціонального покриття. У роботі [2] відзначається, що індій і деякі його сплави можуть використовуватися в якості припою, здатного змочувати скло, кераміку і метали і з'єднувати їх разом. Індій має низьку температуру плавлення і дуже м'який; м'якість дозволяє йому пластично деформуватися і поглинати напруження через невідповідність теплового розширення. Через дуже низький тиск пара індій знаходить застосування в скло-металевих ущільненнях, що використовуються у вакуумній технології [3] і криогенних застосуваннях [4].

Експериментально встановлено, що руйнування реальних матеріалів відбувається при навантаженнях в 10-100 разів менших, ніж передбачають теоретичні дані. На сьогодні різниця реальної міцності від теоретичної пояснюється за допомогою уявлення про існування різних типів дефектів [5]. Для зменшення концентрації напружень, створюваних дефектами, використовуються різні методи: травлення поверхні скла плавиковою кислотою, «залізвання» поверхні скла за допомогою вогневого полірування тощо.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У роботі [6] - обґрунтована можливість використання теорії Ляме-Гадоліна для розрахунку напружень в електронних елементах, що мають форму тіл обертання, зокрема таких металоскляних виробів РЕА, як фотодатчики СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-9, СФ-2-12, СФ-

2-16, ФРЗ-11 (рис. 1). Ці фотодатчики (ФД) є мікроприладами РЕА, що змінюють свої електричні параметри в залежності від освітленості навколишнього середовища або певної інтенсивності світлового потоку, що реєструють наявність випромінювання певної довжини хвилі. Досвід виробництва і експлуатації ФД показав ненадійність конструкції через її недостатню міцність.

В роботі представлені деякі результати проведених авторами досліджень, метою яких було оцінювання напружень, що виникають при виробництві і експлуатації ФД, вибір значення коефіцієнта запасу міцності і конструкторські і технологічні рекомендації щодо їх виробництва.



Рис. 1. Фотодатчики типу СФ

Результати досліджень

Розглянемо, наприклад, скляну деталь, що має форму тіла обертання, спаяну з іншою, наприклад, металевою деталлю, яка охоплює скляну. Введемо наступні припущення: не враховуємо напруження, що виникають внаслідок зміни розмірів при склованні, тобто усадку; закон Гука виконується; справедливою є гіпотеза плоских перерізів.

На рис. 2 представлений переріз вузла виведення через бусинковий склоспай. Скляний циліндр (середній) знаходиться під дією контактної тиску з боку оточуючих його металевих частин. В інших випадках, як наприклад, в діодах, можна вважати, що стінки циліндра знаходяться під дією контактної тиску з боку компаунду і газу, що знаходиться всередині виробу: компаундний циліндр знаходиться під впливом контактних тисків зі боку скляної частини і навколишнього середовища. Таким чином, для всіх випадків слід розглянути розрахунок тіла обертання, що знаходиться під дією контактних тисків по обидва боки.

Розглянемо загальний випадок навантаження циліндрів внутрішнім контактним тиском P_1 і зовнішнім – P_2 . Позначимо r_1 і r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси зовнішнього (металевого) циліндра. У тих випадках, коли задовільною є точність розрахунків 5–6 %, циліндр з відношенням $R_2 / r_2 > 4$ можна розглядати таким, що має нескінченно товсту стінку, при цьому величина контактної тиску q зростає, асимптотично наближаючись до деякого значення. Отже, при інженерних розрахунках можна розглядати навколишню деталь як циліндр з нескінченно великим радіусом.

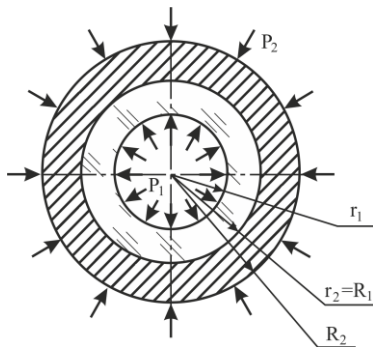


Рис. 2. Розрахункова схема типового вузла РЕА

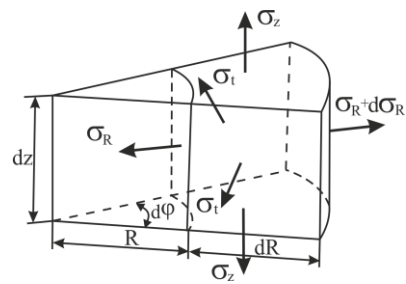


Рис. 3. Рівновага нескінченно малого елемента

Нехай зовнішній циліндр буде навантажений внутрішнім контактним тиском q (з боку деталі, яку він стискує) і зовнішнім P_2 . Якщо розглянути рівновагу нескінченно малого елемента циліндра, утвореного двома поперечними площинами з відстанню dz між ними, двома осьовими площинами, з кутром $d\phi$ між ними і двома циліндрами радіусів R і $(R+dR)$, то можна прийти до відомих формул Ляме:

– для зовнішнього металічного циліндра

$$U_M = \frac{1-2\mu_M}{E_M} \cdot \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} R + \frac{1+\mu_M}{E_M} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R}, \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}, \quad \sigma_t = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}, \quad \sigma_z = \frac{q R_1^2 - P_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad (2)$$

– для внутрішнього скляного циліндра

$$U_c = \frac{1-2\mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1+\mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}, \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}, \quad \sigma_t = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r}, \quad \sigma_z = \frac{P_1 r_1^2 - q r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (4)$$

де σ_R – радіальне напруження; σ_t – тангенціальне напруження; σ_z – осьове напруження; U_M – радіальне переміщення зовнішнього металічного циліндра; U_c – радіальне переміщення внутрішнього скляного циліндра.

Аналіз результатів розрахунків показав, що у розглянутих конструкціях значення як контактних тисків на границях матеріалів, так і напружень в елементах конструкції більші при використанні скла марки С48-2, ніж при використанні скла марки С52-1. Тому запас міцності елементів конструкції більше в останньому випадку.

Встановлено, що окружні напруження σ_{tR_2} в кришках ФД можуть перебувати в інтервалі, що охоплює значний діапазон величин в залежності від фізико-механічних характеристик сполучних матеріалів і законів зміни температури.

Для оцінювання температурних напружень по радіусу виробу використовувалися викладені у роботі [6] методики і математичні моделі. З їх використанням розрахували температурні поля при склоспаї вікончатого вузла кришок ФД на індукційній установці (рис. 2, 3). Результати розрахунків доводять, що при виготовленні бусиноквих склоспаїв для зменшення внутрішніх напружень ефективніше використовувати скло марки С52-1 замість скла С48-2.

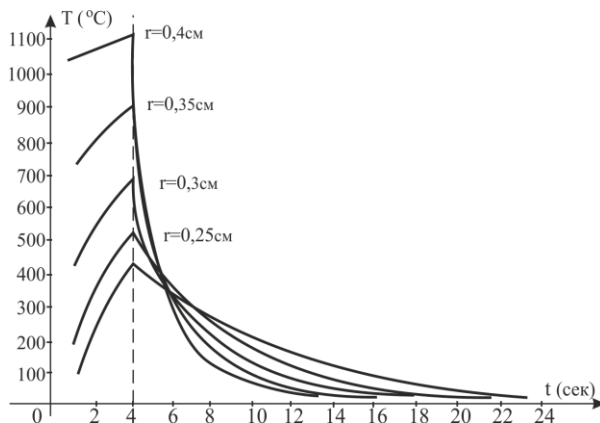


Рис. 2 Зміна температури по радіусу вікончатого склоспаю в залежності від часу

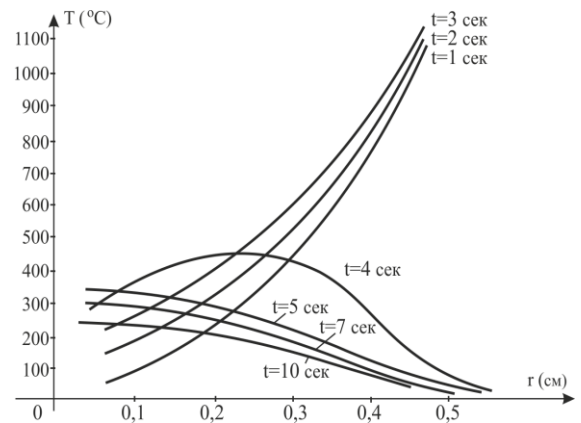


Рис. 3 Зміна температури по радіусу вікончатого склоспаю

Аналіз отриманих даних на рис. 2 і 3 показує, що за перші три секунди температура зовнішньої кромки скла, що з'єднується з металом, досягає 1000°C і відбувається розплав, в той час як в центрі температура не перевищує 200°C. Після відключення індуктора (на четвертій секунді) видно хвильовий процес поширення тепла від краю до центру і назад, що характеризується все ще досить великим градієнтом температур між центром скла і периферією. Необхідно звернути увагу на ту обставину, що при змінах радіусу на 1,5 мм перепад температури лежить в межах лише від 5°C до 50°C, що на порядок менше, ніж при зміні радіуса на 5 мм. Результати контрольних розрахунків для вікончатого скла ФД дають величини напружень $\sigma = (-509,6 \dots 49) \cdot 10^5$ Па, порівнюваних зі значеннями руйнівних напружень для скла С52-1. Якщо врахувати при цьому можливий розкид фізико-механічних характеристик (ФМХ) з'єднувальних матеріалів, що призводить до

збільшення напружень на 20-25%, мікродфекти і концентратори напружень, то стає зрозумілим 86% вихід бракованої продукції [6].

Звідси можна зробити практичний висновок: для вікончатого скла ФД, радіус яких сягає 4-5 мм, доцільно відмовитися від індукційного способу розігріву і віддати перевагу іншому, що забезпечує істотно менший перепад температур.

На підставі зазначених розрахунків заводу-виробнику ФД було рекомендовано змінити технологічний процес створення вікончатих склоспаїв таким чином, щоб зменшити градієнт температури по радіусу виробу. Для цієї мети на початку був використаний багатовитковий обертальний кондуктор, що дозволив дещо вирівняти температурне поле і це зменшило кількість дефектів на склі. Надалі операція склоспаювання здійснювалась з використанням графітових касет, які розміщені в муфельні печі, що дозволило збільшити кількість виробів, що проходять цю технологічну операцію одночасно, і домогтися ще більш рівномірного розподілу температури по радіусу ФД.

Як показують розрахункові дані, напруження в цьому випадку становлять: $\sigma = -47,4 \cdot 10^5$ Па. Економічний ефект від впровадження рекомендації по вирівнюванню температурного поля в процесі операції склоспаювання за рахунок використання муфельної печі і графітових касет склав більше мільйона гривень [6].

Для вузлів іншого класу, наприклад, бусинок склоспаїв, у яких радіус знаходиться в межах 0,8–1,7 мм, причому розігрів йде як з внутрішньої, так і зовнішньої поверхні, індукційний спосіб розігріву є прийнятним.

Був проведений розрахунок допустимого розкиду ФМХ матеріалів, що використовуються при виготовленні ФД. Такими матеріалами є скло С52-1 і сплав квар 29НК. Величини допустимих напружень приймалися наступними: на розтяг $[\sigma]_p = +98 \cdot 10^5$ Па, на стиск – $[\sigma]_{cm} = -441 \cdot 10^5$ Па. Розрахунок напружень проведено для випадку рівномірного розподілу перепаду температури по радіусу виробу: $T = \text{const} = 20^\circ\text{C}$. Результати розрахунків зведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Розкид фізико-механічних характеристик

ФМХ	Одиниця вимірювання	Існуючий розкид	Рекомендований розкид
α_c	град. ⁻¹	$(46-52) \cdot 10^{-7}$	$(46-49) \cdot 10^{-7}$
α_m	град. ⁻¹	$(46-48) \cdot 10^{-7}$	$(46-47) \cdot 10^{-7}$
E_c	Па	$(0,5-0,64) \cdot 10^{11}$	$(0,53-0,59) \cdot 10^{11}$
E_m	Па	$(1,47-1,86) \cdot 10^{11}$	$(1,47-1,7) \cdot 10^{11}$
μ_c	–	0,24–0,26	0,25–0,26
μ_m	–	0,28–0,32	0,29–0,31

Порівняння отриманих значень допустимого розкиду ФМХ, що забезпечують виконання умови міцності склоспая, з ДСТУ, показує, що отримані розрахунковим шляхом значення перебивають менші, у порівнянні з існуючими, діапазони значень. Отже, використання матеріалів з ФМХ, величина яких знаходиться в області значень, близькою до краю допуску, може призвести до виникнення у виробі руйнівальних напружень. Уникнути цього явища можна, наприклад, здійснюючи вхідний контроль ФМХ використаних матеріалів з подальшим погодженням їх партій.

У результаті проведених досліджень була розроблена методика проектного розрахунку на міцність вузлів металоскляних фотодатчиків РЕА, що герметизується компаундами. Методика може бути практично використана конструкторами і технологами. Методика передбачає:

- розрахунок розподілу температури;
- розрахунок температурних напружень для отриманого закону або по одному зі спрощених законів;
- розрахунок контактних тисків і сумарних напружень з урахуванням одночасного впливу тиску і температури;
- визначення напружень, які виникають від експлуатаційних навантажень;
- пошук сумарних напружень в небезпечній точці;
- визначення граничних напружень з урахуванням стану поверхні скла;
- отримання умови міцності.

Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі

Отримані результати у вигляді практичних конструкторських і технологічних рекомендацій і методик можуть використовуватися при виробництві металоскляних виробів РЕА, що дасть змогу підвищити міцність склоспаїв і підвищити надійність РЕА.

Література

1. Замирец Н. В. и др. Конструкторско технологическая концепция механизма образования лазерного сварного соединения в узлах герметизации радиоэлектронных модулей для изделий космической и специальной техники // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – №. 2. – С. 34-41

1. Richard B. Belser (1954). "A Technique of Soldering to Thin Metal Films". *Rev. Sci. Instrum.* 25 (2): 180–183. doi:10.1063/1.1771017
2. Weissler, G. L., and Robert Warner Carlson. *Vacuum physics and technology*. Academic Press, 1980.
3. Döge, Stefan, and Jürgen Hingerl. "A hydrogen leak-tight, transparent cryogenic sample container for ultracold-neutron transmission measurements." *Review of Scientific Instruments* 89.3 (2018): 033903.
4. Abedi, Reza, Robert B. Haber, and Philip L. Clarke. "Effect of random defects on dynamic fracture in quasi-brittle materials." *International Journal of Fracture* 208.1-2 (2017): 241-268.
5. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницкий : ХНУ – 2015. - 313 с

References

1. Zamirets N. V. i dr. Konstruktorsko tekhnologicheskaya kontseptsiya mekhanizma obrazovaniya lazernogo svarnogo soyedineniya v uzlakh germetizatsii radioelektronnykh moduley dlya izdeliy kosmicheskoy i spetsial'noy tekhniki // *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. – 2003. – №. 2. – S. 34-41
2. Richard B. Belser (1954). "A Technique of Soldering to Thin Metal Films". *Rev. Sci. Instrum.* 25 (2): 180–183. doi:10.1063/1.1771017
3. Weissler, G. L., and Robert Warner Carlson. *Vacuum physics and technology*. Academic Press, 1980.
4. Döge, Stefan, and Jürgen Hingerl. "A hydrogen leak-tight, transparent cryogenic sample container for ultracold-neutron transmission measurements." *Review of Scientific Instruments* 89.3 (2018): 033903.
5. Abedi, Reza, Robert B. Haber, and Philip L. Clarke. "Effect of random defects on dynamic fracture in quasi-brittle materials." *International Journal of Fracture* 208.1-2 (2017): 241-268.
6. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Royzman V. P. Khmel'nitskiy : KHNU – 2015. 313 s

Надіслана/Written: 28.10.2020 р.
Надійшла/Received: _____

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 4.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 11%

ID: 82266 Название: Дослідження міцності склоплайв у виробках РЕА Додано в БД: 2020-12-03 Автори: Крушинський Денис Олегович Руководители: Карпова Леся Вікторівна Консультанти: Опоненти: Мартинюк Валерій Володимирович	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	118931	1682	7135 (6%)	108 (6%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

РІШЕННЯ КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА РАДІОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Дослідження міцності склоспаїв у виробках РЕА

Автор: Крушинський Денис Олегович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Карпова Лєся Вікторівна

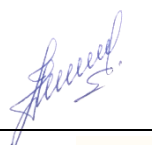
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявлені запозичення не є плагіатом так як відносяться до термінологічних та загальноживаних типових фраз і складають 4,26%

«10» листопада 2020 р.

Науковий керівник



Карпова Л.В.

Завідувач кафедру ТР



Бойко Ю.М.

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу ст. гр. ТРМ-19-1 Крушинського Дениса Олеговича
«ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СКЛОСПАЇВ У ВИРОБАХ РЕА»,
другий освітній рівень (магістр), спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Тема дипломної роботи Крушинського Д.О. відповідає спеціальності, а зміст роботи – затвердженій темі та завданню. Схвально, що у роботі використаний міждисциплінарний підхід, який полягає у широкому застосуванні методів оцінювання міцності і фізико-механічних характеристик, що безпосередньо стосується надійності РЕА. У роботі здійснена спроба узагальнити напрацювання інших вчених і удосконалити їх результати, отримавши нові наукові знання і практичні результати.

Актуальність. Проблема міцності метало скляних виробів РЕА є актуальною, особливо зважаючи на те, що умови експлуатації сучасних РЕА постійно стають все жорсткішими: збільшуються перепади атмосферного тиску (для РЕА літальних апаратів), збільшуються статичні і динамічні силові навантаження (для РЕА на рухомих об'єктах). Руйнування металоскляного контакту викликане недостатньою здатністю розпеченого скла змочувати метал для утворення щільного зв'язку, а також неузгодженим температурним розширенням скла і металу, що може викликати зниження міцності і розгерметизацію ущільнення при охолодженні складання. На стан досліджень по цій проблемі є недостатнім, а тому обрана проблема є актуальною і перспективною.

Стиль викладення матеріалу. Результати, одержані автором, викладені послідовно і добре обґрунтовані. Робота містить достатньо повну інформацію щодо даних експериментів, а тому дає змогу легко оцінити достовірність і правильність проведених розрахунків. Позитивною стороною роботи є наявність у роботі особистих рекомендацій і пропозицій щодо методів досліджень, вдосконалення засобів для проведення експериментів.

Наукова новизна. У роботу увійшли результати, отримані разом з вченими (Ройзман В.П., Ковтуна І.І.). Автор особисто, а також у колективі дослідників отримав наукові результати, які складають наукову цінність у галузі телекомунікацій і радіотехніки, оскільки стосуються оцінювання міцності металоскляних електронних виробів, а саме розрахунково-експериментальний метод, а також обґрунтування ефективної технології їх виготовлення.

Практична цінність. Цінність викладених у роботі результатів для практики полягає у практичному застосуванні розроблених методів і методик для експериментального дослідження механічних напружень у металоскляних виробих РЕА, оцінюванні їх міцності і практичних рекомендацій щодо проектування і їх виготовлення для отримання РЕА з вищими показниками міцнісної надійності.

Недоліки. На жаль, автор не навів дані щодо практичного впровадження своїх досліджень на сучасних підприємствах. Очевидно, що такі впровадження мали б значний економічний ефект. Як зауваження слід відмітити, що деякі рисунки у тексті мають недостатню якість, зустрічаються русизми та орфографічні та стилістичні неточності.

Висновки. Тема роботи є актуальною і сучасною, а рівень використання сучасних технологій у дослідженнях – задовільним. Тема роботи у достатній мірі розкрита. Задачі дослідження виконані, а висновки відповідають пунктам задач. В цілому робота свідчить про достатній рівень загальнотеоретичної і практичної підготовки її автора. Вважаю, що робота відповідає всім вимогам, які ставляться до кваліфікаційних робіт другого освітнього рівня (магістр) спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка і вона заслуговує оцінки «добре».

Завідувач кафедри автоматизацій,
комп'ютерно-інтегрованих технологій і телекомунікацій
Хмельницького національного університету,
д.т.н., проф.



Мартинюк В.В.